



UNIVERSIDADE DO MINDELO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E RECURSOS DO MAR

CURSO DE LICENCIATURA em
ENGENHARIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

RELATÓRIO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ANO LETIVO 2018/2019 – 4º ANO

**Tema: Análise do potencial energético das águas residuais
residenciais: Estudo do caso de um sistema híbrido
butano/biogás**

Autor: Kelvin Renato Da Graça Rodrigues, N.º 3399

Orientadora: Mestre Susana Maria Carvalho de Castro

Mindelo, 2019

**CURSO DE LICENCIATURA EM
ENGENHARIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**RELATÓRIO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
ANO LETIVO 2016/2018 – 4º ANO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ÁGUAS RESIDUAIS
RESIDENCIAIS: ESTUDO DO CASO DE UM SISTEMA HÍBRIDO
BUTANO/BIOGÁS**

AUTOR: KELVIN RENATO DA GRAÇA RODRIGUES, N.º 3399

ORIENTADORA: MESTRE SUSANA MARIA CARVALHO DE CASTRO

Mindelo, 2019

KELVIN RENATO DA GRAÇA RODRIGUES

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ÁGUAS RESIDUAIS
RESIDENCIAIS: ESTUDO DO CASO DE UM SISTEMA HÍBRIDO
BUTANO/BIOGÁS**

Trabalho apresentado à Universidade do Mindelo como
parte dos requisitos para obtenção do grau de
Licenciado em Engenharia em Energias Renováveis.

Orientadora: Mestre Susana Maria Carvalho de Castro

Mindelo, 2019

Dedico este trabalho à minha família, que esteve sempre ao meu lado apoiando-me e incentivando-me para que a realização deste trabalho fosse possível.

Agradecimentos

Uma palavra de agradecimento primeiramente à minha família que me apoiou desde o início, pela educação, esforço, carinho, que sempre me presenteou.

Aos meus colegas de curso com quem tive o prazer partilhar todos esses anos de luta mas também de grandes momentos que levo comigo para a vida.

À Universidade do Mindelo pela oportunidade de me licenciar numa área tão prestigiada como a das Energias Renováveis.

A todos os professores (desde o ensino básico ao ensino universitário) que contribuíram com os conhecimentos transmitidos ao longo desses anos, em especial a minha orientadora Susana Castro pela atenção, disponibilidade e paciência.

A todos que um modo geral que contribuíram direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso da minha formação.

“Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho.”

Dalai Lama

Índice

1. Introdução.....	14
1.1. Justificativa	15
1.2. Objetivos.....	16
1.2.1. Objetivo geral	16
1.2.2. Objetivos específicos.....	16
1.3. Metodologia	17
1.4. Estrutura do trabalho.....	17
2. Estado da arte.....	19
2.1. Biogás	19
2.1.2. Conceito e composição.....	21
2.1.3. Decomposição Anaeróbica	23
2.1.4. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia.....	27
2.1.5. Poder calorífico e equivalência do biogás	33
2.1.6. Biofertilizante	35
2.2. Águas residuais	36
2.2.2. Águas residuais residenciais / domésticas como matéria-prima para a produção de biogás.....	37
2.3. Biodigestores	39
2.3.2. Tipos de biodigestores	39
2.4. Monitoramento e controlo de biodigestores	46
3. Armazenamento de biogás.....	46
4. Tubulações de biogás.....	48
5. Gás butano	49
5.1. Caraterísticas do butano.....	50

5.2.	Combustíveis domésticos em Cabo verde	51
6.	Estudo de caso	52
6.1.	Estimativa de águas residuais residências produzidas	52
6.2.	Biodigestor selecionado	53
6.2.1.	Características do biodigestor / reator UASB.....	53
6.3.	Dimensionamento do biodigestor UASB	54
6.4.	Construção do biodigestor	64
6.5.	Monitoramento e controlo do biodigestor	67
6.5.1.	Controlador multiparâmetros série 9900	67
6.6.	Sistema híbrido butano/biogás	69
6.6.1.	Descrição	69
6.6.2.	Automação do sistema.....	71
7.	Impactes Ambientais	75
8.	Análise financeira	76
8.1.	Custo de implementação do projeto.....	76
8.2.	Redução de custos do consumo de gás butano, derivados da produção de biogás	77
9.	Resultados e discussões	78
10.	Conclusões.....	81
11.	Recomendações	82
12.	Referências Bibliográficas.....	83

Índice de figuras

Figura 1: Produção de biogás em 2012 e a tendência para 2022 em diferentes áreas do mundo.	21
Figura 2: Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.....	24
Figura 3: Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento de arqueas metanogénicas	29
Figura 4: Biodigestor modelo Indiano.....	41
Figura 5: Biodigestor modelo Chinês.....	42
Figura 6: Biodigestor modelo Canadense.....	43
Figura 7: Corte esquemático do biodigestor UASB	66
Figura 8: Sistema híbrido butano/biogás	70
Figura 9: Código compilado	73

Índice de tabelas

Tabela 1: Composição do biogás	22
Tabela 2: Inibidores e sua concentração tóxica em processos de digestão anaeróbia	33
Tabela 3: Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás	34
Tabela 4: Equivalência energética do biogás	34
Tabela 5: Consumo de água numa residência por dia.	52
Tabela 6: Tempo de retenção hidráulica	57
Tabela 7: Dimensões do biodigestor	64
Tabela 8: Materiais para a construção do biodigestor e respectivos custos	65
Tabela 9: Resumo de quantidade de equipamentos do sistema híbrido e respectivos custos	74
Tabela 10: Resumo do custo final do projeto	77
Tabela 11: Resultado dos parâmetros de dimensionamento do biodigestor UASB	79

Índice de abreviaturas e símbolos

A - Área

BRS - Bactérias redutoras de sulfato

CH₄ - Metano

CO₂ - Dióxido de carbono

CO - Monóxido de carbono

COV - Carga Orgânica Volumétrica

CHV - Carga Hidráulica Volumétrica

D - Diâmetro

DBO - Demanda Bioquímica de oxigênio

DQO - Demanda química de oxigênio.

ECV – Escudos Cabo-Verdianos

ETAR - Estação de tratamento de águas residuais

F_T - Fator de correção da temperatura

H₂ - Hidrogênio

h - horas

H - Altura

H₂O - Água

H₂S - Ácido sulfúrico

NBR - Norma Brasileira

N₂ - Azoto

NH₃ – Amoníaco

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONU Organização das Nações Unidas

O₂ - Oxigênio

P - Pressão

PEAD - polietileno de alta densidade

Q - Vazão

SST - Sólidos solúveis totais.

T - Temperatura

TRS - Tempo de Retenção de Sólidos

TRH - Tempo de Retenção Hidráulica

TRM - Tempo de Retenção de Microrganismos

UV - Ultravioletas

UASB – Reator anaeróbio de fluxo ascendente

V_R - Volume do biodigestor

V_s - Velocidade superficial

Resumo

No presente trabalho, fez-se a análise do potencial energético contido nas águas residuais residenciais, tendo em vista o estudo da implementação de um sistema híbrido butano/biogás, automatizado, com o fim de aproveitar o biogás gerado numa residência familiar.

Para a produção de biogás realizou-se uma pesquisa das tecnologias de conversão da biomassa e seus fundamentos. O escolhido acabou por ser o biodigestor UASB, que melhor se enquadrou na realidade do estudo, sendo um dos mais utilizados no tratamento das águas residuais domésticas, sobretudo em países de clima tropicais e subtropicais.

O dimensionamento do biodigestor foi realizado partir de uma vazão média de $0,42 \text{ m}^3/\text{dia}$, derivado de uma estimativa de produção de águas residuais residenciais por pessoa no valor de 105 litros/dia.

Conclui-se que dimensionamento do biodigestor elaborado poderá servir como base para projetos futuros, enquanto o sistema híbrido pode ser utilizado para aproveitamento do biogás gerado a partir de qualquer tipo substrato.

Palavras-chave: potencial energético, águas residuais residenciais, sistema híbrido, biogás.

Abstract

In the present work, the energy potential contained in the residential wastewater was analyzed, in order to study the implementation of an automated butane / biogas hybrid system in order to take advantage of the biogas generated in a family residence.

For the production of biogas, a research was carried out on the biomass conversion technologies and their fundamentals. The chosen one was the UASB biodigester, which best fit the reality of the study, being one of the most used in the treatment of domestic wastewater, especially in tropical and subtropical countries.

The sizing of the biodigester was carried out from an average flow rate of $0.42 \text{ m}^3 / \text{day}$, derived from an estimate of residential wastewater production per person in the amount of 105 liters / day.

It is concluded that the sizing of the elaborated biodigester can serve as a basis for future projects, while the hybrid system can be used to take advantage of the biogas generated from any type of substrate.

Keywords: energy potential, residential wastewater, hybrid system, biogas.

Capítulo I

1. Introdução

O consumo energético e o crescimento populacional são diretamente proporcionais e crescem a velocidades cada vez maiores. Porém o referido consumo faz-se na sua maior parte a partir de fontes de combustíveis fósseis (não renováveis) e que têm motivado preocupações a nível mundial devido aos efeitos negativos que trazem ao meio ambiente, os famosos gases de efeito de estufa. Segundo Santos (2008), esse consumo energético tem motivado uma procura cada vez maior por fontes de energias renováveis ambientalmente mais saudáveis e capazes de suprimir as necessidades energéticas.

A conversão energética da biomassa a partir da digestão anaeróbia (na ausência de oxigénio) constitui uma das fontes com um bom potencial, por meio da produção de biogás como recurso energético.

O presente trabalho analisa o potencial energético das águas residuais residenciais, para a produção de biogás tendo em conta uma residência familiar de cinco pessoas. Consiste no dimensionamento do biodigestor para produção de biogás e construção de um sistema para o seu aproveitamento.

A valorização energética do biogás produzido na digestão anaeróbia, além de permitir obter um retorno financeiro, que ajuda no equilíbrio dos custos de investimento e de exploração, contribui igualmente para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, como o dióxido de carbono e o metano. Quando produzido a partir de águas residuais tem um papel importantíssimo na melhoria do saneamento e evita ao mesmo tempo a contaminação dos lençóis freáticos derivados do lançamento das águas dos esgotos no solo.

Segundo Carvalho *et al.* (2010), em Cabo Verde, as fossas sépticas constituem a mais antiga e mais usada forma de saneamento das águas residuais, porém devido às normas ambientais

cada vez mais exigentes e outros fatores como rendimento, verificou-se uma mudança de estratégia orientada para a construção de infraestruturas de drenagem e tratamento de águas residuais (ETARs).

Em 2010, a evacuação das águas residuais em Cabo Verde era considerada bastante precária, pois de acordo com dados elaborados no âmbito do plano nacional de saneamento básico, conclui-se que a nível nacional, 26,5% da população usavam de fossas sépticas e 14,3% encontravam-se ligados à rede de esgotos, ou seja, cerca de 50,2% da população não tinham acesso a um serviço mínimo e adequado de evacuação das águas residuais, recorrendo à natureza para a satisfação das suas necessidades fisiológicas (Carvalho *et al.*, 2010).

Um estudo recente elaborado pela MUNDI Consulting e Quaternaire Portugal (2018), revelou que o sistema de tratamento de águas residuais no país continua a ser deficiente, apesar de uma melhoria quando comparada aos anos anteriores. Reforçando desta forma a importância de projetos que visam contribuir para a melhoria do saneamento no país, e no caso em estudo aliado a valorização energética das águas residuais domésticas.

Na produção do biogás são gerados subprodutos, nomeadamente biofertilizante que pode ser utilizado para enriquecimento do solo para culturas agrícolas e ainda água tratada que pode ser usado para fins não potáveis. Subprodutos que podem ter valor económico e ambiental e como tal, poderão ajudar a viabilizar o projeto.

1.1. Justificativa

A evolução no tempo tem demonstrado que as utilizações de recursos energéticos renováveis disponíveis afiguram-se cada vez mais essenciais para a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis.

No plano nacional de ação para as energias renováveis estão listados objetivos para a mudança da matriz energética do país. Uma delas é a redução de custos energéticos, com a introdução de fontes renováveis.

O projeto poderá ser uma mais-valia na promoção da bioenergia. Contribuirá para a redução dos custos energéticos, diminuição da emissão dos gases de efeito de estufa uma vez que o biogás produzido substitui combustíveis fósseis e fertilizantes minerais sintéticos, mas também ajudará na melhoria no saneamento e diminuição da contaminação dos corpos hídricos provocada pelo despejo inadequado dos esgotos residências, algo ainda muito usual em cabo verde derivado das condições deficientes de saneamento.

O projeto dará resposta a essas e outras questões, aproveitando o potencial energético contido nas águas residuais residenciais para a produção de biogás a ser usado como substituto parcial do gás butano para uso numa residência, por meio de um sistema híbrido butano/biogás.

Contribuindo assim para a preservação ambiental, saúde pública e equilíbrio económico.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Analisar o potencial energético contido nas águas residuais residenciais e projeção de um sistema híbrido butano/biogás para o aproveitamento do biogás gerado numa residência.

1.2.2. Objetivos específicos

- Rever a literatura disponível sobre o tema;
- Analisar o consumo de água e produção de águas residuais;
- Dimensionar o biodigestor;

- Avaliar a produção de biogás;
- Projetar a automação do sistema híbrido;
- Refletir sobre os resultados obtidos e elaborar sugestões para o futuro;

1.3. Metodologia

Para a realização do presente trabalho, será feita inicialmente uma revisão bibliográfica do tema, com a finalidade de se estabelecer uma boa base de fundamentação teórica, levando em conta uma síntese de vários autores.

Com intuito de avaliar o potencial energético das águas residuais consideradas no trabalho, elaborar-se-á o dimensionamento do biodigestor a partir da estimativa de águas residuais produzidas por uma família. O dimensionamento permitirá determinar a produção de biogás com base nos parâmetros a serem obtidos.

De seguida será elaborado o sistema híbrido butano/biogás, para aproveitamento do biogás gerado. De modo a garantir o sucesso e a sua segurança, realizar-se-á a automação do sistema por meio de um Arduino que irá gerir e comandar o circuito, auxiliado por equipamentos essenciais como sensores e válvulas.

Por fim será feita uma análise aos resultados obtidos e serão tiradas as conclusões finais.

1.4. Estrutura do trabalho

O trabalho encontra-se estruturado em quatro capítulos.

No primeiro capítulo, elaborou-se o enquadramento do projeto no contexto em causa bem como as suas diretrizes.

No segundo capítulo fez-se uma revisão bibliográfica, onde se abordou, o tema biogás, tecnologias de conversão e de aproveitamento mais usuais, sendo o substrato de referência as águas residuais domésticas. Ainda no segundo capítulo se abordou o butano e biogás como fonte de energia utilizada para a cocção de alimentos.

No terceiro capítulo foi definido os parâmetros do projeto, realizou-se o dimensionamento elaborou-se o sistema híbrido butano/biogás.

No último capítulo fez-se uma análise dos resultados obtidos, recomendações e conclusões finais.

Capítulo II

2. Estado da arte

2.1. Biogás

O biogás forma-se a partir da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, tendo um papel fundamental na reciclagem dos nutrientes no planeta.

Segundo Soares *et al.* (2010) a história da utilização do biogás começa por ganhar contornos em 1667 Shirley¹ observa que a decomposição de matéria orgânica nos pântanos gerava um gás, desconhecido quanto à formação e identidade. Seguindo a seguinte cronologia histórica:

- 1776 - O pesquisador Alessandro Volta descobre a presença de metano no gás dos pântanos;
- 1883 - Ulysse Gayon realiza a primeira fermentação anaeróbia, a base de uma mistura de esterco e água;
- 1857 - Foi construída a primeira instalação operacional destinada a produzir gás combustível, para um hospital de hansenianos em Bombaim, Índia. Nessa mesma época, são estabelecidas as bases teóricas e experimentais da biodigestão anaeróbia pelos pesquisadores Fischer e Schrader, na Alemanha e Grayon, na França, entre outros;
- 1890 - Donald Cameron projeta uma fossa séptica para a cidade de Exeter, Inglaterra, sendo o gás produzido utilizado para iluminação pública. Ainda em 1890 Van Senus verificou que a decomposição anaeróbia era feita por vários microrganismos e Omeliansui isolou organismos que produziam hidrogénio, ácido acético e butírico, a

¹ Thomas Shirley foi o cientista responsável pela descoberta do biogás (gás dos pântanos ou fogo fátuo como era conhecido) no Reino Unido em 1667.

partir da celulose. Deduziu também que o metano seria produzido a partir da redução do dióxido de carbono por hidrogénio;

- 1910 - Sohngen verifica que a fermentação de materiais orgânicos produz compostos reduzidos como hidrogénio, ácido acético e dióxido de carbono, demonstrando ainda também que ocorre a redução de CO₂ para a formação de metano e assumiu que o ácido acético é descarbonizado para fermentação de metano. Hipótese que esteve em controvérsia por várias décadas mas atualmente considerada correta (Soares *et al.*, 2010).

Sganzerla (cit. in Soares *et al.*, 2010) aponta para Bombaim como o “berço” do biodigestor, onde o primeiro biodigestor foi posto em funcionamento regular no início do século XX e se instalou o primeiro biodigestor de sistema contínuo em 1950 por Patel.

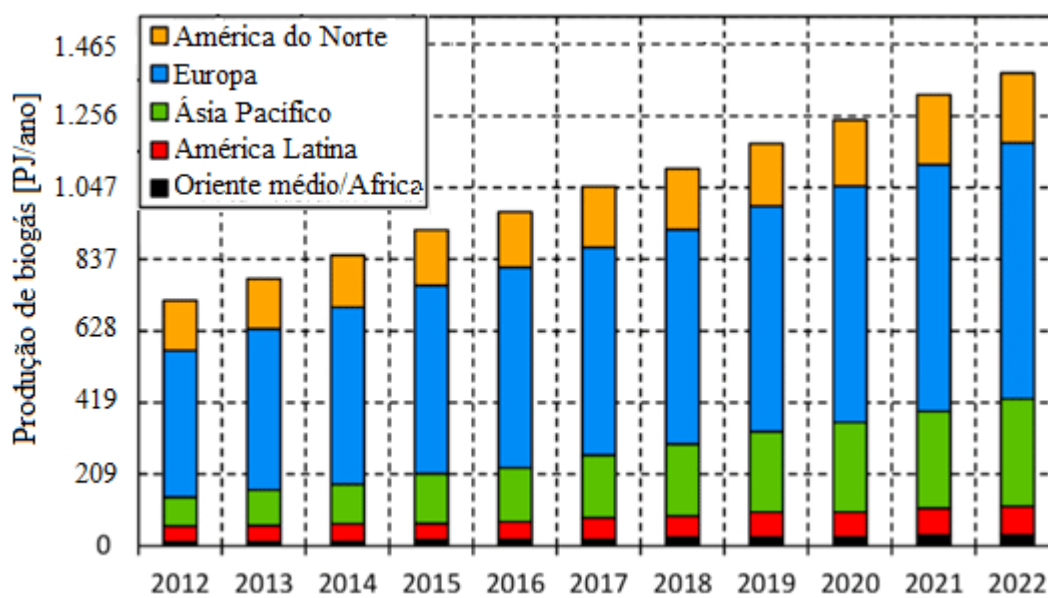
A China e a Índia foram os primeiros países a produzir biogás e a utilizá-lo como fonte de energia. Inicialmente, a matéria-prima era proveniente de restos de comidas e dejetos em geral, sendo o biogás produzido utilizado para iluminação e cozimento.

Na segunda metade da década de 1900, esses países começaram a aproveitar o processo de digestão anaeróbica para geração de biogás com foco nos lodos de esgoto, mas curiosamente apenas com o objetivo de reduzir a quantidade do lodo. Já nos anos 70 com a crise do petróleo decidiu-se aproveitar o biogás produzido e investir em pesquisas para a otimização da digestão anaeróbica. Resultando em grandes progressos e consequente aumento de popularidade na década 1990, com a elaboração de vários projetos de biogás na China e na Índia (Karlsson *et al.*, 2014).

A produção de biogás tem ganhado grandes proporções a nível global. No ano 2011, a sua produção representou um valor de 19% do consumo global de energia (REN21 cit. in Raboni *et al.* 2014).

A produção mundial de biogás no ano de 2012 e sua projeção esperada para o ano de 2022 pode ser verificada na figura que se segue.

Figura 1: Produção de biogás em 2012 e a tendência para 2022 em diferentes áreas do mundo.



Fonte: adaptado de Pike Research (cit. in Raboni *et al.*, 2014).

2.1.2. Conceito e composição

Biogás é uma mistura gasosa, resultante da decomposição anaeróbica da matéria orgânica (ausência de oxigênio) aliado a fatores favoráveis como humidade, temperatura e PH. (CENBIO, 2001).

Na natureza o processo da decomposição anaeróbica e consequente produção de biogás acontece em pântanos, fundos de lagos, esterqueiras e no rúmen de animais ruminantes (Peterson *et al.*, 2010). A respetiva produção também é possível por meio de diversos resíduos orgânicos, sendo eles: dejetos de animais, resíduos residenciais e industriais, restos de curtumes, fábricas de alimentos e lixos orgânicos (Oliveira, 2009).

Essencialmente constituída por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), a composição do biogás é influenciada principalmente pelos substratos utilizados, pela técnica de fermentação e pelas diferentes tecnologias de construção de centrais (Peterson *et al.*, 2010).

Tabela 1: Composição do biogás

Composição	Fonte do biogás			
	Resíduos orgânicos (CASTAÑÓN, 2002)	Diferentes fontes (AL SEADI <i>et al.</i> , 2008)	Diferentes fontes (BIRKMOSE <i>et al.</i> , 2007)	Média geral ZACHOW (2000)
Metano (CH ₄)	40-75	50-75	55-75	50-75
Dióxido de carbono (CO ₂)	25-40	25-45	25-45	25-40
Hidrogénio (H ₂)	1-3	<1	0-3	1-3
Azoto (N ₂)	0,5-2,5	<2	1-5	0,5-2,5
Oxigénio (O ₂)	0,1-1,0	<2	Traços	0,1-1,0
Ácido sulfúrico (H ₂ S)	0,1-0,5	<1	0,1-0,5	0,1-0,5
Amoníaco (NH ₃)	0,1-0,5	<1	----	0,1-0,5
Monóxido de carbono (CO)	0-0,1	----	0-0,3	0-0,1
Vapor de água (H ₂ O)	-----	2-7	----	Variável

Fonte: adaptado (Neto *et al.*, 2016).

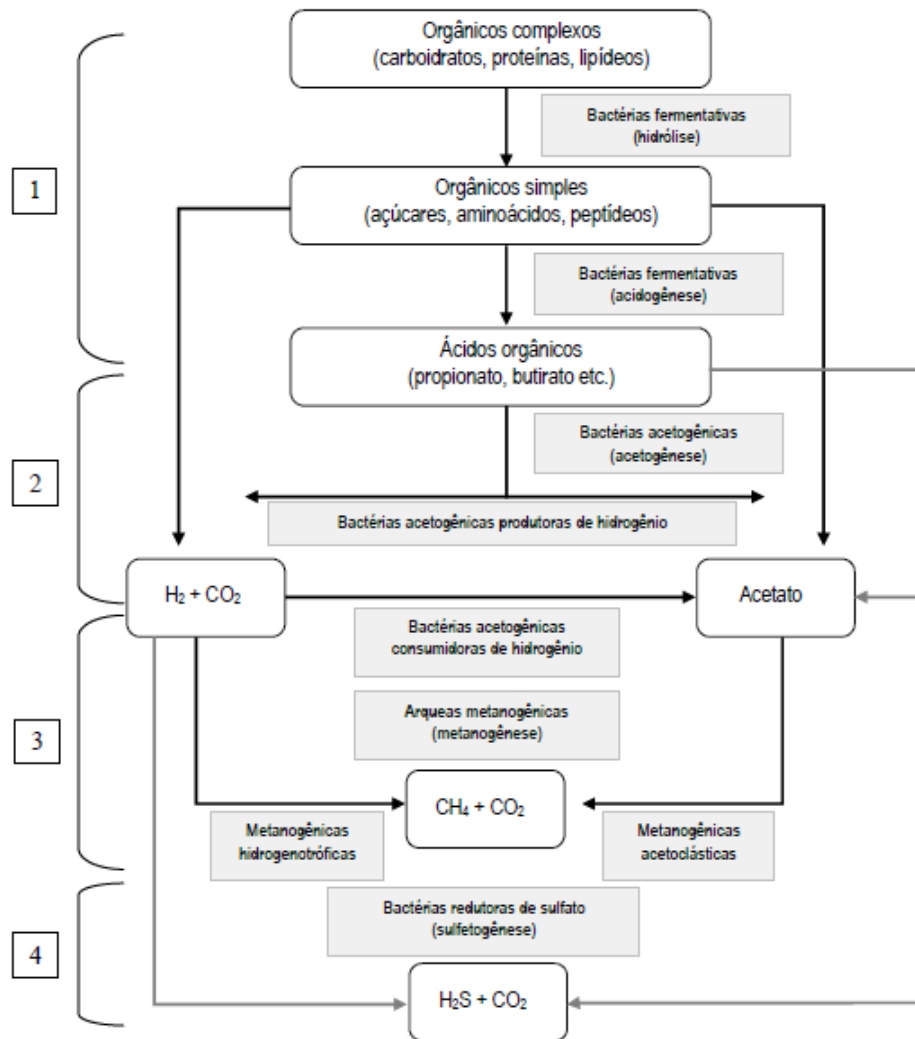
O biogás pode ser utilizado em fogões, lampiões, campânulas, chocadeiras, secadores diversos, motores de combustão interna, conjunto motobomba, geradores de energia elétrica (Alves *et al.*, 2010).

O biogás é considerado um combustível renovável, limpo e poderá ser um substituto de gás butano. A sua combustão não liberta fumaça, evitando a presença de resíduos nas panelas facilitando a vida da dona de casa. A sua utilização sistemática reduz os custos do gás, incluindo o produto, transporte e armazenagem (Alves *et al.*, 2010).

2.1.3. Decomposição Anaeróbica

Na decomposição anaeróbia (ausência de oxigênio), os compostos orgânicos são degradados e estabilizados pela ação das bactérias anaeróbias. Os compostos orgânicos complexos são convertidos em compostos mais simples, até ter como produto final a formação de gases, como metano, dióxido de carbono, vapor de água, gás sulfídrico, amoníaco e novas células bacterianas. Os microrganismos anaeróbios utilizam o sulfato, o nitrato e o dióxido de carbono como aceptadores de elétrons. Há que realçar porque nem toda a parcela da matéria orgânica é transformada na digestão anaeróbia e uma parcela é perdida junto com o efluente do reator (Metcalf *et al.* 2003; Chernicharo 1997; Speece 1996; Campos 1990 cit. in Prado 2006).

Figura 2: Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia



Fonte: Chernicharo (cit.in Lobato 2011).

Na figura (2) Chernicharo (cit. in Lobato 2011) considera a decomposição anaeróbica resumida em quatro estágios:

➤ Estágio 1 (acidogênese)

De acordo com Wandrey (cit. in Paterson *et al.* 2010) no primeiro estágio matéria orgânica complexa é convertida em moléculas mais simples pela ação de bactérias:

- Hidrolíticas - as enzimas libertadas transformam proteínas em péptidos de menores dimensões e aminoácidos, polissacarídeos em monossacarídeos e gorduras em ácidos gordos, por meio de reações bioquímicas;
- Fermentativas acidogénicas - transformam produtos anteriores, em ácidos gordos de cadeia curta (ácidos acético, propiónico e butírico), dióxido de carbono e hidrogénio.

São adicionalmente originados pequenas porções de ácido láctico e álcoois. Por fim realçar que os tipos de compostos formados nesse estágio dependem da concentração do hidrogénio intermediário (Wandrey cit. in Paterson *et al.* 2010).

➤ Estágio 2 (Fase Acetogénese)

Nesta etapa, bactérias acetogénicas convertem os produtos gerados no primeiro Estágio, em:

- Ácido acético (CH_3COOH)
- Hidrogénio (H_2)
- Hidróxido de Carbono (CO_2)

A pressão parcial do Hidrogénio torna-se fundamental nesta etapa, visto que por razões de cunho energético, uma concentração de hidrogénio muito elevada impede a conversão dos compostos intermediários da acidogénese. O resultado é a acumulação de ácidos orgânicos inibidores da metanogénese. Razão pela qual, as bactérias acetogénicas (produtoras de hidrogénio) têm de estar estreitamente associadas a arqueas² metanogénicas. Pois o meio propício para as bactérias acetogénicas é assegurado durante a formação do metano, quando as arqueas metanogénicas consomem hidrogénio e dióxido de carbono (transferência interespecífica de hidrogénio) (Paterson *et al.* 2010).

² Arques metanogénicas são organismos que utilizam o hidrogénio para reduzir o dióxido de carbono e produzir metano.

➤ Estágio 3 (Fase Metanogénese)

Segundo Lobato (2011) nesta etapa as arqueas metanogénicas (acetoclásticas e hidrogenotróficas) convertem o acetato e o hidrogénio produzidos nas etapas anteriores em metano e dióxido de carbono.

Nos biodigestores a produção de metano pode ocorrer por meio da decomposição do ácido acético e pela redução do dióxido de carbono. O primeiro processo ocorre na ausência de hidrogénio, quando pela ação das arqueais metanogénicas acetoclásticas o grupo metil do ácido acético é reduzido a metano enquanto o grupo carboxílico é oxidado a dióxido de carbono, como pode ser verificado pela equação(1).



No segundo processo, já na presença do hidrogénio, o dióxido de carbono que se encontra sempre em abundância nos biodigestores anaeróbios é reduzido a metano, dada pela equação(2). O CO₂ funciona como aceitador dos átomos de hidrogénio removidos dos compostos orgânicos pelas enzimas (Van Haandel *et al.* 1994; Chernicharo, 2007; cit. in Lobato 2011).



➤ Estágio 4 (sulfetogénese)

Chernicharo (cit. in Lobato 2011) afirma que, além dos três estágios da digestão anaeróbia anteriormente descritos, pode-se adicionar um quarto estágio, a sulfetogénese. Este estágio consiste na redução de sulfato e formação de sulfeto. Na produção de sulfeto, o sulfato e outros compostos à base de enxofre são utilizados como aceitadores de eletrões, durante a

oxidação de compostos orgânicos. Neste processo, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de bactérias redutoras de sulfato (BRS).

Com a presença de sulfato nas águas residuais, muitos dos compostos intermediários, formados durante a degradação anaeróbia, passam a ser utilizados pelas bactérias sulforredutoras, provocando alteração nas rotas metabólicas (Chernicharo cit. in Lobato 2011).

2.1.4. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia

➤ Oxigénio

As arqueas metanogénicas estão entre os seres vivos mais antigos da Terra, tendo-se originado numa época em que a atmosfera era muito diferente da que hoje conhecemos. Por isso, esses microrganismos precisam de um ambiente livre de oxigénio.

Para a maioria das espécies de arqueas, uma quantidade pequena de oxigénio já é suficiente para impedir que sobrevivam. No entanto, é impossível evitar completamente que o oxigénio penetre no biodigestor. Mesmo sob essas condições, as arqueas metanogénicas não são inibidas nem cessam a sua atividade imediatamente. Algumas das espécies de bactérias, as denominadas bactérias anaeróbias facultativas, sobrevivem tanto em ambientes com oxigénio quanto em sua completa ausência. Desde que a entrada de oxigénio não seja excessivamente grande, essas bactérias consomem-no antes que ele prejudique as arqueas metanogénicas, dependentes de um meio sem oxigênio. É por essa razão que o oxigénio do ar introduzido no gasómetro do biodigestor para a biodessulfurização não tem impacto negativo sobre a formação de metano (Paterson *et al.*, 2010).

➤ Temperatura

A temperatura é um dos fatores que maior influência tem no processo de digestão anaeróbia, condicionando determinantemente o tipo de bactérias anaeróbias que se desenvolvem, a sua

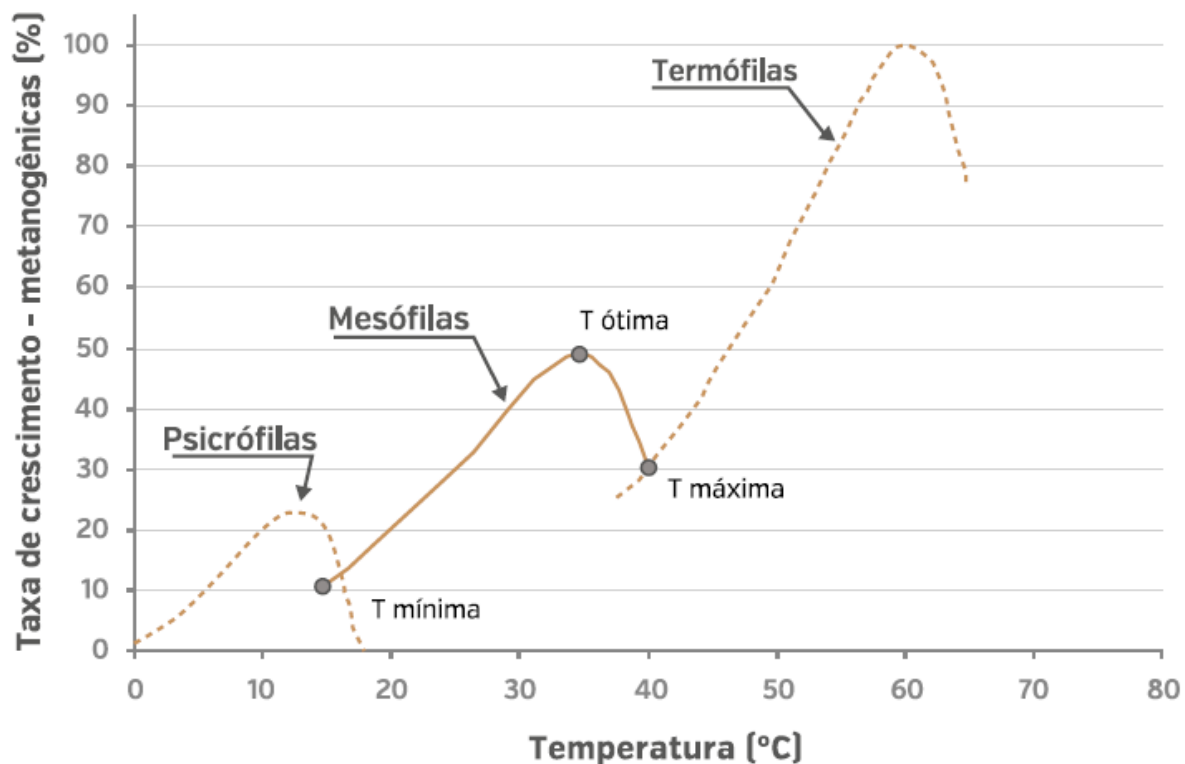
velocidade de crescimento, a produção de biogás, o grau de utilização do substrato, a duração do arranque do digestor e a sua capacidade de resposta a variações súbitas na carga afluenta (CCE,2000 cit. in Monte 2010).

Segundo Silveira *et al.* (2015) para o crescimento microbiano, são diferenciadas as seguintes faixas:

- Faixa psicrófila: menor que 20°C;
- Faixa mesófila: entre 20 e 40°C;
- Faixa termófila: maior que 40°C.

As bactérias fermentativas atingem a sua taxa máxima de crescimento (100%), nas condições termófilas, entre 50 e 55°C, enquanto, nas condições mesófilas, encontram o ótimo (65% de taxa máxima) entre 30 e 40°C (Bischofsberger *et al.*, cit.in Silveira et al., 2015).

Figura 3: Influência da temperatura sobre as taxas relativas de crescimento de arqueas metanogênicas



Fonte: Adaptado por Silveira *et al.* (Chernicharo 1997).

Pires (cit. in. Monte 2010) afirma que a faixa psicrófila caracteriza-se pelas dificuldades no arranque e no funcionamento dos digestores, devido a reduzida velocidade de crescimento das bactérias. Sob estas condições de temperaturas inferiores a 20°C, a digestão dos substratos complexos é, de um modo geral, limitada pela velocidade da etapa hidrolítica.

Ambas as faixas, mesófilas e termófilas, apresentam certa desvantagem operacional. A faixa mesófila, por englobar temperaturas mais baixas, acaba por retardar a ação microbiana e, conseqüentemente, reduzir a taxa de degradação do substrato. Isto acarreta o decaimento da quantidade de biogás a ser produzida e, também pode causar esgotamento da energia celular (Mayer cit. in Castro *et al.*, 2016).

A faixa termófila favorece a cinética da reação aumentando a sua velocidade produzindo maior quantidade de biogás, todavia, há constrangimentos. Alguns cientistas afirmam que quanto maior for a temperatura, menor será o rendimento da reação. Uma vez que, altas temperaturas favorecem a formação de ácidos voláteis e amoníaco (produtos intermediários da reação) inibindo assim a ação das bactérias metanogénicas (Mayer cit. in Castro *et al.*, 2016).

➤ pH

Cada grupo de microrganismos apresenta uma gama ótima de pH para o seu desenvolvimento no meio (Appels *et al.* Cit.in. Monte, 2010).

Segundo Chernicharo (cit. in Silveira et al., 2015), a faixa ótima de pH para manter a atividade de arqueias metanogénicas é relativamente estreita, entre 6,8 e 7,5, enquanto as bactérias fermentativas têm sua faixa ótima de pH entre 5,0 e 6,0, tendo tolerância para valores de pH de até 4,5. Essa diferença causa um dos principais problemas operacionais: a diminuição do valor de pH acelera a atividade de bactérias fermentativas, enquanto os consumidores de seus produtos, que são muito mais lentos, são inibidos pelo aumento de acidez.

Em meios com pH baixos, os principais produtos são o ácido acético e o ácido butírico, enquanto em meios com pH da ordem de 8,0, os principais produtos são o ácido acético e o ácido propiónico (Appels *et al.*, cit. in Monte 2010).

Dadas as diferentes exigências dos microrganismos em termos de pH, pode ser aconselhável proceder à divisão do processo anaeróbio em duas etapas distintas: num primeiro digestor decorrem as duas primeiras fases do processo – a hidrólise e a acidogénese – procedendo-se à correção do pH da alimentação para os valores mais favoráveis às bactérias fermentativas; num segundo digestor decorre as duas últimas fases do processo – a acetogénese e a metanogénese – onde se corrige o pH para valores mais próximos da neutralidade, mais favoráveis às bactérias metanogénicas. Nas situações em que se dispõe de um único reator,

opta-se, geralmente, por manter os valores de pH próximos de 7, no sentido de evitar a inibição das bactérias metanogénicas (CCE cit. in., Monte 2010).

No caso de tratamento anaeróbio de esgoto e lodo de ETAR (Estação de tratamento de águas residuais), vale ressaltar que a operação com cargas relativamente equilibradas normalmente garante um equilíbrio entre produção e consumo de ácidos orgânicos e, consequentemente, o pH pode ser mantido entre 6,8 e 7,5. Caso contrário, é recomendado reduzir a carga orgânica (DQO), dosar alcalinizante ou aumentar a alcalinidade com co-substratos (Silveira *et al.*, 2015).

➤ Disponibilidade de nutrientes

De acordo com Seyfried *et al.* (cit. in. Paterson *et al.*, 2010) cada espécie de microrganismo envolvido na decomposição anaeróbia tem sua necessidade própria de vitaminas, micro e macronutrientes. A taxa de crescimento e a atividade das diversas populações estão condicionadas à concentração e a disponibilidade desses nutrientes. Os limites máximos e mínimos de concentração típicos de cada espécie são difíceis de definir, uma vez que existe uma grande diversidade de culturas, em parte caracterizadas por uma excecional capacidade adaptativa. A fim de que se produza o máximo de metano do substrato utilizado, a disponibilidade dos nutrientes para os microrganismos deve ser mantida em níveis ótimos. A quantidade de metano que pode ser obtida do substrato é determinada pelo seu teor de proteínas, gorduras e hidratos de carbono.

Os principais elementos necessários à síntese de material orgânico são o carbono (C), o hidrogénio (H), o oxigénio (O) e o azoto (N). Embora em menores quantidades, a síntese celular requer a presença de outros elementos como o enxofre para a síntese de aminoácidos, o fósforo para a formação dos ácidos nucleicos, fosfolípidos, o potássio, cálcio, magnésio e ferro para a formação de complexos metálicos vitais e como co-fatores para a atividade enzimática (Prescott *et al.*, 1996; CCE, 2000 cit. in Monte 2010).

Braun (cit. in Paterson *et al.*, 2010) afirma que após o carbono, o azoto é o nutriente mais importante, sendo necessário para a formação de enzimas responsáveis pela realização do metabolismo. Por isso, é importante que o substrato tenha a relação C/N correta. Uma relação C/N muito elevada (muito carbono e pouco azoto) reduz a atividade metabólica. Como consequência, o carbono não é completamente degradado e o rendimento de metano não atinge o seu pico máximo. Inversamente, a abundância de azoto pode causar a formação excessiva de amoníaco (NH_3), capaz de inibir o crescimento das bactérias mesmo em baixas concentrações, podendo até ocasionar o colapso de toda a população de microrganismos.

➤ Inibidores e toxidade

A inibição representa uma redução reversível da atividade de microrganismos, enquanto o efeito tóxico é irreversível, exigindo o crescimento de uma nova população microbiana. Compostos inibidores e tóxicos podem estar presentes no substrato ou serem liberados no próprio processo.

A toxidade tem origem em determinadas substâncias que servem como micronutrientes (sódio, cálcio, potássio, magnésio, ferro, cromo, manganês, selênio, iodo, chumbo, molibdênio, níquel, arsênio) quando usadas em concentrações elevadas, ou em interação com outras condições. Relacionado ao tratamento anaeróbio na ETAR, as substâncias mais críticas são o oxigênio, o azoto amoniacal, os compostos sulfurados, os ácidos orgânicos e os metais pesados (Silveira *et al.*, 2015).

Tabela 2: Inibidores e sua concentração tóxica em processos de digestão anaeróbia

Inibidor	Concentração de inibição	Observação
Oxigénio	> 0,1 mg/l	Inibição das arqueas metanogénicas anaeróbias obrigatórias.
Sulfeto de Hidrogénio	> 50 mg/l H ₂ S	Quanto menor o pH, maior o efeito inibitório.
Ácidos gordos voláteis	> 2.000 mg/l HAc (pH = 7,0)	Quanto menor o pH, maior o efeito inibitório. Alta adaptabilidade das bactérias.
Azoto amoniacal	> 3.500 mg/l NH ₄ ⁺ (pH = 7,0)	Quanto maiores o pH e a temperatura, maior o efeito inibitório. Alta adaptabilidade das bactérias.
Metais pesados	Cu > 50 mg/l Zn > 150 mg/l Cr > 100 mg/l	Só metais dissolvidos apresentam efeito inibidor. Descontaminação pela precipitação de sulfeto.
Desinfetantes antibióticos	N.E.	Efeito inibitório varia com o composto.

Fonte: Adaptado de Weiland (cit. in Paterson *et al.*, 2010)

A presença de matérias tóxicas, detergentes e outros químicos, devem ser evitados ao máximo pois basta uma concentração muito baixa destes produtos para provocar a intoxicação e morte das bactérias (Costa, 2006).

2.1.5. Poder calorífico e equivalência do biogás

O poder calorífico do biogás varia diretamente com a presença do metano na sua composição, ou seja, quanto maior a quantidade de metano maior será o poder calorífico que normalmente se situa entre 5.000 a 6.000 kcal/m³. Porém com a purificação do biogás o poder calorífico do biogás pode atingir valores de até 12.000 kcal/m³ pelos processos de remoção do carbono

(Filho 1981). Como poderá ser observado pela tabela de variação do poder calorífico que se segue.

Tabela 3: Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás

Composição Química do Biogás	Peso Específico (kg/Nm ³)	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4.229,98
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01
95% CH ₄ , 05% CO ₂	0,7768	10.469,60
99% CH ₄ , 01% CO ₂	0,7268	11.661,02

Fonte: Avellar (cit. in Costa 2016).

Segundo Silva (2014), além do poder calorífico, pressão, presença de contaminantes ou acidez, um dos fatores importantes para se estudar a viabilidade do emprego biogás, quer como recurso energético ou combustível complementar, passa por determinar a equivalência energética do biogás. Essa equivalência pode ser verificada pela tabela seguinte.

Tabela 4: Equivalência energética do biogás

1 m³ de biogás = 5500 kcal, é equivalente à:	
1,7 m ³ de metano	0,25 m ³ de propano
0,0008 m ³ de gasolina	0,0013 m ³ de álcool
2 kg de carbureto de cálcio	0,0007 m ³ de gásóleo
6,5 kw/h de eletricidade	2,7 kg de madeira
1,4 kg de carvão de madeira	0,2 m ³ de butano

Fonte: adaptado de Silva (2014).

2.1.6. Biofertilizante

Segundo Alves *et al.* (2010), após o processo da digestão anaeróbia no interior do biodigestor, o efluente que sai apresenta alta qualidade para uso como fertilizante agrícola. Dependendo do substrato utilizado, em média apresentam 1,5 a 2,0% de azoto, 1,0 a 1,5% de fósforo e 0,5 a 1,0% de potássio.

Trata-se de um adubo orgânico, não possui odor, não é poluente, isento de agentes causadores de doenças e pragas às plantas e contribui de forma extraordinária no restabelecimento do teor de húmus³ do solo, funcionando como melhorador de suas propriedades químicas e físicas e melhora a atividade microbiana do solo, que tem importante papel na sua estruturação. Pode ser aplicado diretamente no solo na forma líquida ou desidratada, dependendo das condições locais, porém, possui uma carga orgânica muito elevada para ser lançado nos corpos hídricos, devendo somente ser usado como fertilizante (Oliver *et al.*, cit. in Alves *et al.* 2010).

Comastri Filho (cit. in Alves *et al.* 2010) afirma que o biofertilizante apresenta um pH em torno de 7,5 e funciona como corretor da acidez do solo ao liberar o fósforo dos sais insolúveis de alumínio e ferro, minimizando assim o problema da toxicidade do alumínio e do ferro no solo, tornando-o adequado para as plantas.

O biofertilizante apresenta alta qualidade, devido:

- A redução do teor de carbono (C) do material, liberada na forma de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂);
- Ao aumento no teor de azoto e demais nutrientes, em consequência da liberação do carbono;
- A diminuição da relação C/N da matéria orgânica, que melhora a utilização agrícola;

³ Húmus é a matéria orgânica depositada no solo, que resulta da decomposição de animais e plantas mortas, ou de seus subprodutos.

- A maior facilidade da utilização do biofertilizante pelos microrganismos do solo, devido ao avançado grau de decomposição;
- A solubilização parcial de alguns nutrientes, deixando-os mais facilmente disponível às plantas;
- Pode ser utilizado no controle de pragas e doenças.

Apesar das muitas qualidades a utilização do biofertilizante deve ser controlada, para não exceder o limite de nutrientes no solo e para evitar a contaminação do lençol freático e das águas superficiais (Alves *et al.* 2010).

2.2. Águas residuais

Metcalf *et al.* (cit. in Pina 2010) definem águas residuais como sendo a combinação dos resíduos líquidos drenados das residências, instituições, estabelecimentos comerciais e industriais, podendo também estar associados com água pluvial.

As águas residuais podem ser divididas em três grupos:

- Águas residuais domésticas/residenciais – são águas residuais residenciais provenientes das atividades domésticas e do metabolismo humano;
- Águas residuais industriais – são as águas originadas das atividades que não são consideradas domésticas ou pluviais;
- Águas residuais urbanas – são as águas residuais domésticas ou quando estas se misturam com as industriais e/ou pluviais (Pina 2010).

2.2.2. Águas residuais residenciais / domésticas como matéria-prima para a produção de biogás

A qualidade da água residual residencial varia consoante a localização, hábitos pessoais e a época do ano (Metcalf *et al.*, cit. in Pina 2010), independentemente dessa variação a sua composição base inclui:

- Matéria orgânica - como é o caso da água negra que é proveniente dos sanitários, essencialmente composta por fezes e urina e ainda a água cinzenta que é proveniente dos restantes usos domésticos a qual inclui os restos de comidas, proteínas, detergentes, óleos, hidrocarbonetos, fenóis;
- Matéria inorgânica - por exemplo sais, ácidos e bases;
- Microrganismos - bactérias, vírus, fungos, protozoários;
- Metais - cádmio, crómio, chumbo, mercúrio, alumínio;
- Constituintes gasosos - oxigénio, o dióxido de carbono, o ácido sulfídrico e o metano (Metcalf *et al.*, 2003; Henze *et al.*, 1997 cit. in. Pina 2010).

A contribuição por pessoa na composição das águas residuais domésticas varia diretamente com o consumo de água por habitante, que por sua vez, depende do nível de vida da população e da oferta de água. Teoricamente o homem pode subsistir com cinco litros de água por dia. Mas considerando as águas utilizadas para higiene pessoal e doméstica, essa necessidade é de 40 a 50 litros por habitante. Quanto mais complexo o meio em que vive, maior é o consumo de água. O habitante de uma cidade deve dispor de 100 litros por dia, porém se consideradas as condições de vida em países industrializados ou em regiões com culturas irrigadas, o consumo pode atingir 400 ou 500 litros (OMS cit. in Vieira 1996).

De acordo com a origem a matéria orgânica presente nas águas residuais, apresentam capacidades de degradação por ação microbiana diferentes. No caso de fezes, urina, restos de comidas e proteínas são consideradas matéria orgânica facilmente biodegradável, enquanto

compostos como detergentes, óleos e gorduras, hidrocarbonetos e fenóis são considerados como matéria orgânica dificilmente biodegradável (Henze *et al.*, 1997 cit. in Pina 2010).

Segundo Santo (2008) a consciência crescente de que o tratamento de águas residuais é de vital importância para a saúde pública e para o combate à poluição das águas de superfície, levou à necessidade de se desenvolver sistemas que combinam uma alta eficiência a custos baixos de construção e de operação. E ainda assim, o tratamento dos efluentes deve ser corrigido e aperfeiçoado de tal maneira que o seu uso ou a sua disposição final possa ocorrer de acordo com as legislações ambientais. Portanto, nas últimas décadas, desenvolveram-se vários sistemas que se baseiam na aplicação da digestão anaeróbia para a remoção do material orgânico de águas residuais.

Tabela: Valores típicos de carga de poluente de uma água residual doméstica

Parâmetro	EPA (2002)	Metcalf & Eddy (2003)	Henze <i>et al.</i> (1997)	Butler and Davies (2004)
	g/(hab.dia)	g/(hab.dia)	g/(hab.dia)	g/(hab.dia)
Sólidos Totais	115 - 200	-	-	-
Sólidos Voláteis	65 - 85	-	-	-
Sólidos Suspensos Totais	35 - 75	-	82 - 96	60
Sólidos Suspensos Voláteis	25 - 60	-	-	48
CBO ₅	35 - 65	50 - 120	55 - 69	60
CQO	115 - 150	110 - 295	-	110
Azoto Total	6 - 17		14 - 20	12
Azoto Amoniacal	1 - 3	9 - 21,7	-	8
Fósforo Total	1 - 2	2,7 - 4,5	4 - 6	3
Óleos e Gorduras	12 - 18	10 - 40	-	-
COV's	0,02 - 0,07	-	-	-
Detergentes	2 - 4	-	2 - 3	-
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	-	60 - 150	-	-
Sulfatos (em SO ₄)	-	-	-	20

Fonte: Pina (2010).

2.3. Biodigestores

Biodigestor é uma câmara de fermentação cujo objetivo é a criação de um ambiente anaeróbico, isto é, na ausência de oxigênio, totalmente favorável à ação das bactérias anaeróbicas perante a biomassa a ser digerido, produzindo gás (Filho 1981).

O biodigestor pode ser construído de alvenaria, concreto, entre outros materiais e a sua estrutura pode ser vertical, cilíndrica e superficial (acima do solo). Nesse último caso, possui uma campânula cujo nome é gasómetro onde se acumula o gás gerado na decomposição da biomassa (Filho 1981; Pinto cit. in Frigo *et al.*, 2010).

2.3.2. Tipos de biodigestores

Para se fazer a escolha do biodigestor apropriado ao tipo de resíduo na produção do biogás, deve-se inicialmente compreender os princípios de operação dos biodigestores e ter conhecimento de três parâmetros básicos importantes, Tempo de Retenção de Microrganismos (TRM), Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) e Tempo de Retenção de Sólidos (TRS) de cada tipo de biodigestor bem como as suas características microbiológicas (Fukayama cit. in Frigo *et al.*, 2010). Segundo Filho (1981) nessa escolha deve-se levar ainda em conta:

- Condições do local de instalação;
- Disponibilidade de substrato;
- Experiência e conhecimento do construtor;
- Investimento envolvido;

➤ Biodigestor Modelo Indiano

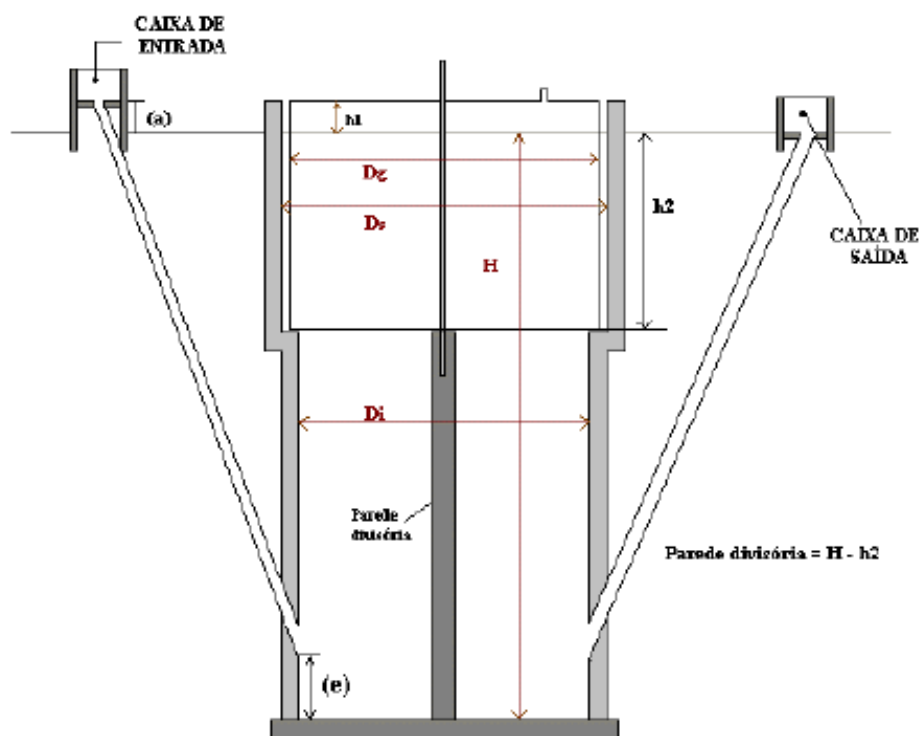
Segundo Deganutti *et al.* (2002) o biodigestor indiano caracteriza-se por possuir uma campânula como gasómetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação, ou em um selo d'água externo o que reduz as perdas na produção do gás. Uma parede central

divide o tanque de fermentação em duas câmaras cuja função é a de fazer com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação.

A pressão de operação deste modelo é constante e regulada pelo gasómetro, isto porque o não consumo imediato do gás produzido e consequente aumento de volume provocaria um aumento de pressão no interior do mesmo mas que nesse caso é regulado pelo deslocamento vertical do gasómetro (Deganutti *et al.*, 2002).

Os resíduos geralmente mais usados são os dejetos bovinos e/ou suínos, devido a regularidade de fornecimento de dejetos, uma vez que este modelo de biodigestores deverão ser alimentadas de forma contínua e com biomassa de no máximo 8% de concentração de sólidos totais, de modo a facilitar a circulação na câmara de fermentação e evitar entupimentos nos canos de entrada e saída de material. Por último realçar que este tipo de biodigestor é de fácil construção, no entanto, o fato do gasómetro ser de metal e a dificuldade de transporte poderão elevar o custo final e inviabilizar sua implementação (Deganutti *et al.*, 2002).

Figura 4: Biodigestor modelo Indiano



Fonte: Deganutti *et al.*, 2002.

➤ Biodigestor Modelo Chinês

Este modelo de biodigestor é quase totalmente construída em alvenaria (tijolos) incluindo a câmara de fermentação com a forma cilíndrica, bem como o teto abobado, impermeável, destinado ao armazenamento do biogás, dispensando o gasômetro feito de chapa de aço o que permite a redução dos custos. Porém a estrutura deve ser bem vedada e impermeabilizada de modo a evitar possíveis vazamentos do biogás (Deganutti *et al.*, 2002).

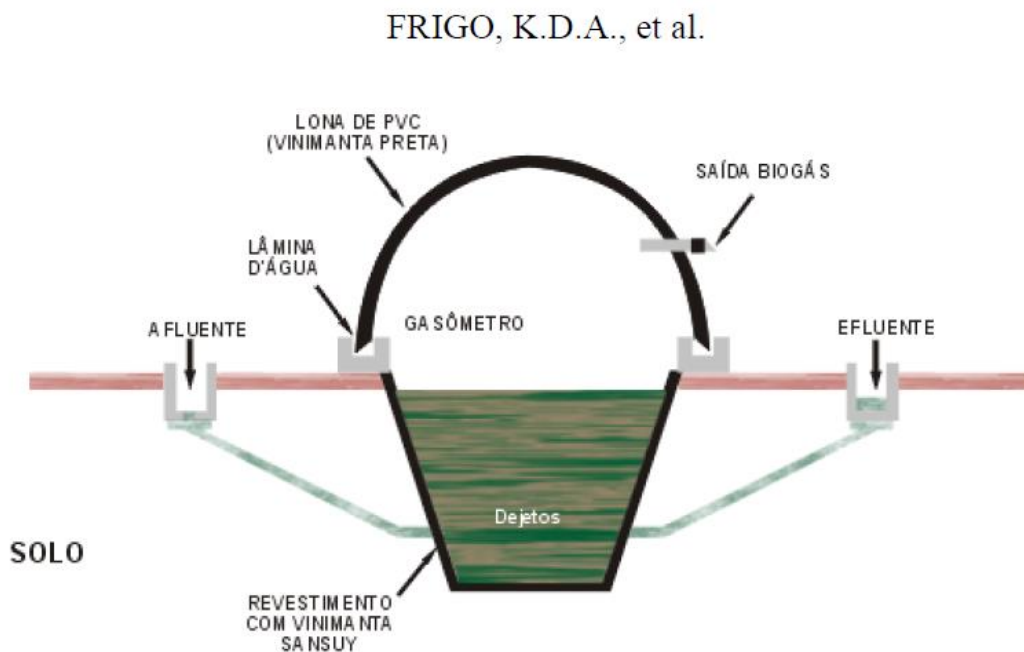
Este biodigestor funciona com base no princípio de prensa hidráulica, de modo que o aumento de pressão em seu interior resultante da acumulação de biogás resultará em deslocamentos do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando ocorre descompressão (Deganutti *et al.*, 2002).

A câmara de fermentação é subterrânea e revestida com lona plástica, o biogás produzido é armazenado numa campânula, o efluente a ser liberado encontra-se numa caixa de saída. Existe ainda um registro para a saída do biogás e um queimador conectado a esse registro. O local da sua instalação deve proporcionar o menor risco possível a furos para evitar vazamento do gás produzido (Pereira *et al* cit. in Frigo *et al.*, 2010).

Este modelo deverá ser totalmente vedado. Pode ser alimentado de forma contínua ou em uma única vez por ciclo, é apropriado tanto para pequenas ou grandes propriedades e projetos agroindustriais (Oliver cit. in Frigo *et al.*, 2010).

O maior obstáculo deste equipamento é o alto custo da cúpula devido ao tipo de material que é feito (Castanho *et al.*, 2008).

Figura 6: Biodigestor modelo Canadense



Fonte: Deganutti cit. in Frigo *et al.*, 2010.

- **Biodigestor de fluxo ascendente (UASB)**

O reator anaeróbio de fluxo ascendente e de manta de lodo ou reator UASB (do inglês, *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), pode apresentar vários formatos, como tanques cilíndricos, quadrados e retangulares. Em todas configurações, o reator UASB consiste basicamente em três partes fundamentais em sua coluna ascendente: leito de lodo, zona de sedimentação, e o separador trifásico. O separador de fases tem por finalidade dividir a zona de digestão, onde se encontra a manta de lodo responsável pela digestão anaeróbia e a zona de sedimentação (Hamerski cit. in Tunes 2017).

Utilizados amplamente para o tratamento de águas residuais industriais e domésticas, sejam de natureza simples ou complexa, de baixa ou de alta concentração, solúveis ou com material particulado. Esses reatores são utilizados especialmente nos casos cuja finalidade é a eliminação ou a conversão da matéria orgânica em metano e a recuperação de água após o tratamento no processo industrial (Berni *et al.*, cit. in Tunes 2017).

O UASB é capaz de suportar altas taxas de carga orgânica, quando comparado com outros da mesma geração, é de simples construção, baixo investimento de capital, baixos requisitos de área e de energia, menor geração de lodo, curtos tempos de retenção hidráulica, baixo custo de manutenção e bom potencial para geração de biogás (Chernicharo 2006; Zhao *et al.*, 2008; Khan *et al.*, 2011; cit. in Tunes 2017).

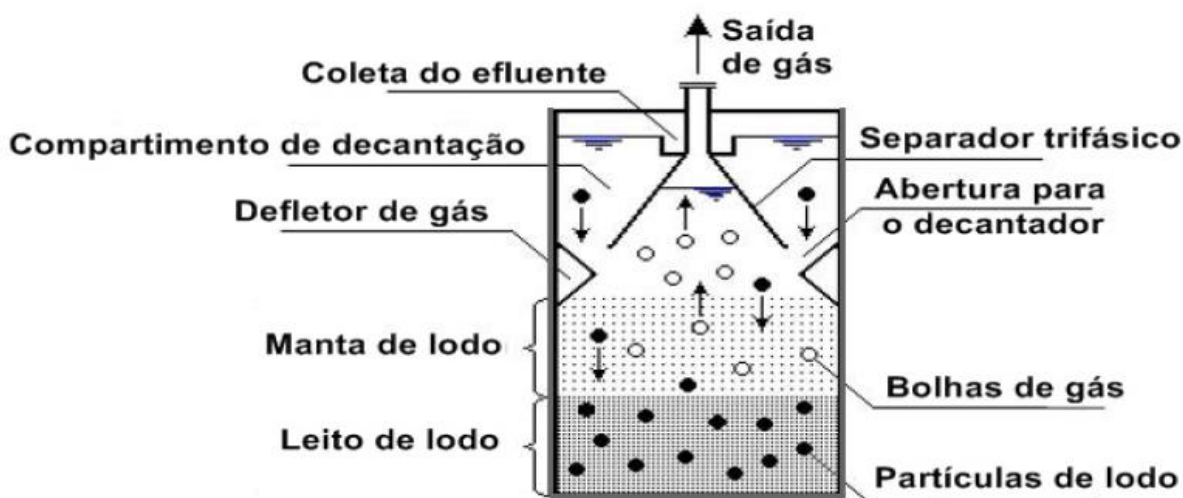
O afluente a ser tratado é bombeado de forma ascendente a partir fundo do reator, uniformemente, e escoar através do lodo biológico ativo (leito de lodo), onde ocorrem as reações necessárias ao seu tratamento. O efluente tratado é coletado na parte superior do reator, em vertedores ou tubulações perfuradas, enquanto o gás produzido no compartimento de reação na forma de bolhas é coletado na parte central do separador trifásico no alto do reator (Von Sperling cit. in Tunes 2017).

Segundo Lettinga *et al.* (cit. in Tunes 2017) este modelo apresenta vantagens entre as quais menor produção de lodo e gasto energético, porém caso não seja bem projetado ou operado pode trazer consigo consequências devastadoras. Para garantir uma alta capacidade de tratamento e elevada eficiência foram estabelecidas certas condições básicas a serem seguidas:

- Separação efetiva entre o biogás, o efluente tratado e o lodo;
- O lodo anaeróbio deverá apresentar boa decantabilidade e deve-se desenvolver e se manter preferencialmente sob a forma granular;
- A alimentação do sistema deve ser feita, sempre que possível, pelo fundo do reator, de forma a proporcionar um melhor contato entre o despejo e o lodo anaeróbio ativo;
- O arraste de partículas de lodo (grânulos) deve ser minimizado criando-se condições nas placas defletoras para que essas partículas floculem, decantem e/ou fiquem retidas em um leito de lodo secundário que se cria na superfície das placas.

Deve-se ainda ter extremo controle de fatores como: partida (*start-up*), granulação, pH, temperatura, carga orgânica volumétrica, tempo de retenção hidráulica e velocidade ascensional de modo a garantir alta capacidade de tratamento do mesmo.

Figura 6: Biodigestor UASB



Fonte: Capassi *et al.*, 2013.

2.4. Monitoramento e controle de biodigestores

O monitoramento de biodigestores permite monitorar as variáveis do processo de biodigestão, podendo ser útil para estimar a carga de substrato e sua composição, bem como a oportunidade de detectar (e recuperar) o rendimento do processo, frente às esperadas e inesperadas condições ambientais (Friehe *et al.*; Jantsch *et al.* cit. in Shubeita *et al.* 2014). Alguns indicadores que tradicionalmente têm sido utilizados para o monitoramento são a taxa de produção de gás, composição gasosa, temperatura, alcalinidade, pH e concentrações de ácidos (Shubeita *et al.* 2014).

O monitoramento pode ser realizado através de atividades automatizadas ou ainda, realizar um controle do processo mais detalhado que pode ser feito de forma manual por um operador, ou automática com auxílio de alguma tecnologia (Friehe *et al.*, cit. in Shubeita *et al.* 2014).

A prática atual de automatização da operação do biodigestor visa utilizar um sistema de controle para supervisão e aquisição de dados no biodigestor (comumente chamado de SCADA). O sistema é responsável, por exemplo, pelo monitoramento de temperatura, volume de matéria orgânica, pressão do gás, incluindo a geração de registros de monitoramento para novas ações ou controle (Shubeita *et al.* 2014).

Dependendo das medidas observadas, o operador pode ser induzido a incluir novos substratos (ou mudar outras variáveis) para melhoria do processo de digestão com intuito de prover alta eficiência do biodigestor (Jantsch *et al.* cit. in Shubeita *et al.* 2014).

3. Armazenamento de biogás

Segundo Parterson *et al.* (2014) o armazenamento do biogás torna-se um fator importante sobretudo quando a produção ultrapassa o consumo, muitas vezes derivados de picos de na produção. Os reservatórios de biogás, denominados de gasômetros deverão ser impermeáveis a gases, resistentes à pressão, raios UV (ultravioletas), temperatura, tempestades e à ação do

contato das substâncias. Devem estar equipados com mecanismos de segurança contra sobrepressão e subpressão, visando evitar que a pressão interna se altere para níveis não aceitáveis.

O armazenamento do biogás pode ser feito de forma não pressurizado de 0 kPa a 0,1 kPa (1 mbar), a baixa pressão (0,5 à 30 mbar) confeccionados em lonas impermeáveis ou ainda média e alta pressão (5 à 250 bar) em cilindro e tanques de aço (Parterson *et al.*, 2014).

Segundo Parterson *et al.* (2014). Existem dois sistemas possíveis de armazenamento de biogás, em reservatórios internos no biodigestor de forma integrada ou armazenado de forma separada na parte externa, podendo apresentar as seguintes formas construtivas:

- Balão de PVC fixo e separado;
- Balão de PVC abrigado em edifício separado ou tanque;
- Balão de PVC em teto intermediário acima do biodigestor;
- Bolsa plástica pendente em edificação;
- Armazém com lona de membrana dupla;
- Cilindro e tanques de aço;

Vantagens:

- A concentração de metano no biogás em formação pode ser medida no gasômetro do biodigestor (nele, o volume de gás é pequeno e a mistura de gases baixa) e reflete a atividade dos microrganismos (Parterson *et al.*, 2014);

Desvantagens:

- Exigem, possivelmente, espaço extra;
- Conforme o caso, podem exigir uma edificação adicional (Parterson *et al.*, 2014);

4. Tubulações de biogás

Segundo Silveira *et al.* (2015), os tubos condutores de biogás devem ser fabricados em aço inoxidável ou em plástico apropriado, considerando a maior resistência possível à corrosão. Esses tubos devem ser, preferencialmente aéreos e devidamente identificados.

Os tubos de polietileno de alta densidade (PEAD), apesar de serem plásticos, são considerados apropriados para o guiamento do biogás, diferentemente dos tubos de policloreto de vinila (PVC). O emprego de tubos de PEAD deve considerar o coeficiente de expansão térmica de 0,20 mm/(m.K), principalmente quando o tubo não for assentado em valas (Silveira *et al.* 2015).

Os tubos plásticos normalmente apresentam baixa estabilidade estrutural, motivo pela qual deve-se instalar um número suficiente de suportes para mantê-los suspensos, de modo a evitar curvaturas e pontos indesejáveis de acúmulo de água condensada (Silveira *et al.*, 2015).

Os trechos de tubo entre possíveis fontes de ignição e as válvulas corta-chamas devem ser à prova de explosão e devem suportar uma pressão de, no mínimo, 6 bar.

Segundo Silveira *et al.* (2015) de modo geral, os tubos condutores de biogás devem apresentar as resistências que se seguem:

- **Mecânicas** - Tensões mecânicas induzidas por deformação, variação térmica, vibrações, entre outras devem estar previstas no projeto dos gasodutos e devem ser compensadas por meio da instalação de liras de dilatação e juntas de expansão;
- **Térmicas** - Os gasodutos devem atender a requisitos de proteção contra incêndio, em especial quando forem constituídos por materiais plásticos, devendo apresentar uma resistência elétrica menor que 109 Ohm;
- **Químicas** - Os gasodutos devem ser resistentes à ação corrosiva de compostos ácidos provenientes, por exemplo, da combinação entre sulfeto de hidrogênio e água;

Segundo Silveira *et al.* (2015) para o dimensionamento dos gasodutos, deve-se:

- Garantir velocidades de transporte do biogás (sem bombeamento) variem entre aproximadamente 3 m/s (média) e 5 m/s (valor máximo);
- Adotar o diâmetro mínimo dos tubos de 50 mm (NBR 12209:2011);
- Prever que uma alimentação intermitente dos reatores anaeróbios com esgoto ou lodo pode causar picos de geração de biogás;
- Garantir que o sistema de coleta e de transporte de biogás deve permita certa variação de pressão operacional, de modo a evitar o acionamento desnecessário das proteções de sobrepressão e subpressão, causadas pelo acionamento de equipamentos que consomem biogás;
- Visar à menor perda de carga possível inerente ao transporte do biogás até queimadores ou sistemas de recuperação energética;
- Assegurar que as eventuais conexões entre trechos de tubos sejam realizadas de modo a garantir o confinamento do biogás no interior do gasoduto.

O biogás, via de regra, é saturado de vapor de água, resultando na ocorrência de condensação. Para a eliminação do condensado do sistema com segurança, sem escape de biogás, durante a instalação os gasodutos devem ser inclinados em direção a pontos de purga ou dreno. É aconselhável, que o gasoduto seja provido de pontos que permitam a retirada de amostras de biogás, bem como que possibilitem a inspeção e a limpeza dos trechos de tubo que o compõem (Silveira *et al.*, 2015).

5. Gás butano

O butano (C_4H_{10}) ou n-butano é um gás incolor, inodoro, altamente inflamável. Derivado de fonte de energia não-renovável (que não se renova facilmente na natureza), pode ser obtido pelo aquecimento lento do petróleo e do gás natural por refinação e do gás natural por

refinação de gás ou através de cracking⁴ de hidrocarbonetos com elevado número de átomos de carbono (Francisco, W.C; Infopédia 2019).

Principalmente utilizado como gás de cozinha e na indústria como matéria-prima na produção de borracha sintética, o butano também é muito comum em isqueiros, aquecimento de saunas e piscinas, além de já ter sido combustível para dirigíveis (Francisco, W.C).

O gás butano pode ser facilmente liquefeito sobre pressão e é comercializado no estado líquido em recipiente de aço. Por não possuir odor, é introduzida uma substância com cheiro detetável nos recipientes com butano (garrafas ou tubulações), caso contrário não seria possível detetar um vazamento, dificultando, assim, o controle de possíveis acidentes (Francisco, W.C; Infopédia, 2019).

5.1. Caraterísticas do butano

Segundo Mesquita (2005) o butano para redes de gás apresenta as seguintes características:

- Fórmula química: C_4H_{10}
- Mais denso que o ar: $d = 2,01$
- Poder calorífico:
 $PCS \ 11000 \text{ Kcal/m}^3$
 $PCI \ 10800 \text{ Kcal/m}^3$
- Índice de Wobbe:
 $\text{Superior } 87,3 \text{ MJ/m}^3 \quad 8222 \text{ Kcal/m}^3$
 $\text{Inferior } 80,5 \text{ MJ/m}^3 \quad 7600 \text{ Kcal/m}^3$
- Pressão nominal de utilização: 30 mbar.
- Temperatura de ebulição à pressão atmosférica: 0°C .
- Pressão de vapor à temperatura de 15°C : 1,8 bar.

⁴ O cracking é um processo que permite obter hidrocarbonetos leves a partir da quebra de hidrocarbonetos pesados (hidrocarbonetos de moléculas grandes).

- Limite de inflamabilidade entre 1,9% e 8,5%.

5.2. Combustíveis domésticos em Cabo verde

Em Cabo verde, o processo de importação, armazenamento, distribuição e venda de GPL (Gás Liquefeito de Petróleo) é feito de forma conjunta pelas empresas Enacol e Vivo Energy, antiga Shell Cabo Verde. A única instalação de armazenagem a granel⁵ está localizada na cidade da Praia, ilha de Santiago, e é constituída por duas esferas de 750 Toneladas, construídas em 1985 (Mendes *et al.* 2005).

O transporte do GPL da ilha de primeira descarga (Santiago) para outros centros de consumo é realizado em contentores para estações de enchimento em algumas ilhas ou em garrafas por via marítima, implicando a movimentação de uma quantidade considerável de gás inter-ilhas, com custos elevados. O GPL para consumo final é distribuído por uma rede de revendedores, de responsabilidade das duas empresas, disponível em todas as ilhas mesmo nas zonas rurais. É comercializado em botijas de 3 e 6 Kg que utilizam queimadores de alta pressão acoplados diretamente nas garrafas, e botijas de 12.5 e 55 Kg normalmente acoplados a fogões com queimadores de baixa pressão e equipados com redutores (Mendes *et al.* 2005).

Atualmente o gás butano pode ser fornecido para utilização doméstica ou industrial através de canalização própria a partir de instalações localizadas no exterior dos edifícios e com recurso a garrafas de 12,5 Kg e 55 Kg ou reservatórios de gás com diferentes capacidades, consoante as necessidades (ENACOL, 2011).

⁵ Quando os produtos são armazenados em grandes quantidades, no seu estado bruto.

Capítulo III

6. Estudo de caso

6.1. Estimativa de águas residuais residuais produzidas

O consumo de água está diretamente ligado à produção de águas residuais domésticas, porém nem toda a água consumida numa residência dá origem a águas residuais, motivo pela qual, nos cálculos que se efetuarem não se levará em conta as águas utilizadas para cozinhar, rega de plantas, lavagem de carros, entre outros.

Para a determinação do consumo de água numa residência, considerar-se-á uma família de cinco pessoas, o referido consumo irá depender de diversos fatores o que tornará complicado avançar com um valor exato. A variação é motivada pelos hábitos de higiene da população, localização, situação económica, clima, tipo de instalação hidráulico-sanitária das residências e educação ou não para uso racional da água.

Tabela 5: Consumo de água numa residência por dia.

Uso de Água	Quantidade de água/pessoa (l)	Quantidade de água/família (l)
Água para banho	30	150
Descarga sanitária	20	100
Lavatório	5	25
Lavagem de louças	15	15
Limpeza	20	20
Lavagem de roupa	15	15
Total/dia (l)	105	325

Fonte: elaboração própria

Os valores das quantidades de água usados na limpeza, lavagem de roupas e louças permanecem inalterados para a determinação de consumo de água por família, pois, os membros da família partilham a mesma residência, logo os dados de consumo de água por pessoa referentes as tarefas mencionados anteriormente já englobam a família inteira.

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), cada pessoa necessita de 110 litros de água por dia para atender as necessidades de consumo e higiene. Logo o valor obtido de 105 litros de água por dia, na estimativa realizada encontra-se dentro dos parâmetros aceitáveis.

6.2. Biodigestor selecionado

De entre os diversos biodigestores existentes para a produção de biogás, neste caso específico será utilizado o biodigestor de fluxo ascendente UASB, uma vez que de acordo com as suas características enquadra-se melhor no caso em estudo, pois segundo Lettinga *et al.* (cit. in Oliveira, R.; Foresti, E., 2004) o seu desenvolvimento combinou vantagens, as quais possibilitaram a sua utilização para o tratamento de uma grande variedade de águas residuais e consequente adoção em larga escala.

Podem ser aplicados em todo o mundo para o tratamento de efluentes de fábricas de bebidas (cervejas, refrigerantes, sucos de frutas), alimentos (amidos, glicose, batatas, doces, balas, chocolates, gelatina, café solúvel, aditivos, laticínios), papel e celulose, centrais de açúcar/destilarias de etanol, químicas/petroquímicas, enzimas e esgoto doméstico (Legner, 2015).

6.2.1. Características do biodigestor / reator UASB

- **Reator UASB:** são formados por um tanque com um sistema de distribuição de efluentes no fundo, um sistema de separação trifásico na parte superior.

- **Tanque reator:** pode ser cilíndrico, retangular ou quadrado, executado em concreto ou chapa metálica de aço carbono (em ambos os casos exige-se uma boa impermeabilização/revestimento interno com material adequado (poliuretano elastomérico) uma vez que o ambiente anaeróbio é bastante agressivo - compostos de enxofre e ácidos orgânicos voláteis principalmente na parte superior do reator).
- **Sistema de distribuição de efluentes no fundo do reator:** deve ser projetado/executado de forma que consiga o melhor contato entre os efluentes e os microrganismos presentes no reator anaeróbio. São conhecidas diversas patentes sobre distribuidores de fundo em reator UASB.
- **Sistema trifásico de separação (sólidos/líquidos/gás):** instalado na parte superior do tanque. É sem dúvida o principal acessório de um reator anaeróbio UASB, pois seu desenho/projeto propiciará o melhor dimensionamento do tanque/reator. São normalmente construídos em materiais não sujeitos a corrosão (plástico de engenharia – polipropileno) ou eventualmente em concreto ou fibra de vidro para os reatores UASB menos engenhosos e normalmente utilizados para o tratamento de esgoto doméstico. Materiais metálicos devem ser evitados. Também existem patentes em vigor de diferentes tipos de separadores trifásicos para reatores UASB.
- **Tubulações internas de coletas de efluente tratado, biogás e amostras:** as tubulações internas preferencialmente devem ser fabricadas em plástico de engenharia – PEAD, PP) (Legner, 2015).

6.3. Dimensionamento do biodigestor UASB

O biodigestor será dimensionado em função da estimativa de produção de águas residuais numa residência familiar de cinco pessoas. Levou-se em conta uma síntese de obras e pesquisas realizadas por diversos autores, que se enquadram na realidade do projeto. Sendo

assim possível estabelecer critérios e determinar os melhores métodos com o fim de gerar resultados dignos de confiança.

A partir de resultados obtidos do dimensionamento e funcionamento de um biodigestor UASB de 120 m³ tratando esgoto doméstico, Vieira (1996) estabeleceu critérios para nortear o dimensionamento deste tipo de biodigestor, visando a estabilidade do processo e servirão a seguir de referência:

- Temperatura ambiente: mínima 7°C e máximo 34°C;
- Temperatura líquida no interior do reator: mínima 17°C e máximo 33°C;
- DBO⁶ do esgoto bruto: 150 a 200 mg/L;
- DQO⁷ do esgoto bruto: 330 a 390 mg/L;
- SST⁸ do esgoto bruto: 150 a 180 mg/L;

➤ **Determinação das vazões**

Um dos primeiros passos para se iniciar o dimensionamento passa por determinar a vazões do projeto. Com uma população de cinco pessoas, todos com acesso direto a rede de coleta de água residual resultando num índice de atendimento de 100% e o consumo de água por pessoa de 105L/dia, determinou-se a vazão média ($Q_{\text{méd.}}$) segundo CETESB (cit. in. filho *et al.* 2018) perante um coeficiente de retorno de 0,8 (NBR cit. in filho *et al.* 2018):

$$Q_{\text{méd.}} = Q_{\text{pessoa}} * 0,8 * \text{Pop} * I_{\text{at}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{méd.}} = 105 * 0,8 * 0,5 * 5 * 1$$

$$Q_{\text{méd.}} = 420 \text{ L/dia} = 0,42 \text{ m}^3/\text{dia}$$

⁶ DBO - Demanda bioquímica de oxigénio.

⁷ DQO - Demanda química de oxigénio.

⁸ SST - Sólidos solúveis totais.

Onde:

- $Q_{\text{méd.}} = \text{Vazão média (m}^3/\text{dia)};$
- $Q_{\text{pessoa}} = \text{Vazão por pessoa (L/dia)};$
- $\text{Pop.} = \text{População atendida no projeto};$
- $I_{\text{at}} = \text{Índice de atendimento};$

Após a determinação da vazão média do projeto procedeu-se ao cálculo das vazões máximas e mínimas baseadas em Medeiros, adotando coeficiente do dia de maior consumo $K_1 = 1,2$ e coeficientes da hora de maior e menor consumo com valores respectivos de $K_2 = 1,5$ e $K_3 = 0,5$ (CETESB, 1978; Azevedo *et al.*, 1977 cit. in Medeiros).

$$Q_{\text{máx.}} = Q_{\text{méd.}} * K_1 * K_2 \quad (4)$$

$$Q_{\text{máx.}} = 0,42 * 1,2 * 1,5$$

$$Q_{\text{máx.}} = 0,756 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_{\text{min.}} = Q_{\text{méd.}} * K_3 \quad (5)$$

$$Q_{\text{min.}} = 0,42 * 0,5$$

$$Q_{\text{min.}} = 0,21 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Onde:

- $Q_{\text{méd.}} = \text{Vazão média (m}^3/\text{dia)};$
- $Q_{\text{max.}} = \text{Vazão média (m}^3/\text{dia)};$
- $Q_{\text{min.}} = \text{Vazão por pessoa (L/dia)};$
- $K_1 = \text{Coeficiente do dia de maior consumo};$
- $K_2 = \text{Coeficiente da hora de maior consumo};$
- $K_3 = \text{Coeficiente da hora de menor consumo};$

➤ Cálculo do Volume

Para a obtenção do volume do biodigestor serão consideradas vazões médias, porém será necessário primeiramente determinar o tempo de retenção hidráulica (TRH) que segundo Lettinga *et al.* (cit. in Vieira 1996) varia diretamente com a temperatura.

Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica a temperatura média mensal em Cabo Verde varia entre 20°C e 26°C, o que possibilita determinar o TRH para 8 horas de acordo com a tabela que se segue.

Tabela 6: Tempo de retenção hidráulica

Temperatura, °C	Tempo médio, h	Tempo mínimo, h (*)
16 – 19	>10 – 14	>7 – 9
20 – 26	>6 – 9	>4 – 6
>26	>6	>4
(*) Durante 4 a 6 horas		

Fonte: Campos (cit. in filho *et al.* 2018).

O volume do biodigestor foi determinado segundo Filho *et al.* (2018) pela seguinte equação:

$$V_R = \left(\frac{Q_{\text{méd.}}}{24} * \text{TRH} \right) / 1000 \quad (6)$$

$$V_R = \left(\frac{420 * 8}{24} \right) / 1000$$

$$V_R = 0,14 \text{ m}^3$$

Onde:

- V_R = Volume do Biodigestor (m^3);
- $Q_{\text{méd.}}$ = Vazão média (m^3/dia);
- TRH = Tempo de Retenção Hidráulica (horas);

➤ Cálculo da área

Segundo Chernicharo (cit. in Capassi *et al.* 2013) para se determinar a área do biodigestor deve-se determinar primeiramente a altura do biodigestor (H), com base na velocidade superficial que situa-se entre 0,5 m/h e 0,7 m/h.

Todos os cálculos do dimensionamento serão realizados de acordo com Chernicharo (cit. in Capassi *et al.* 2013), considerando uma velocidade superficial de 0,5 m/h.

$$H = V_s * TRH \quad (7)$$

$$H = 0,5 * 8 = 4 \text{ m}$$

Onde:

- H = Altura do Biodigestor (m);
- V_s = Velocidade superficial (m/h);
- TRH = Tempo de Retenção Hidráulica (horas);

Uma vez determinada a altura do biodigestor, encontrou-se a área (A) pela seguinte equação:

$$A = \frac{V_s}{H} \quad (8)$$

$$A = \frac{0,5}{4} = 0,125 \text{ m}^2$$

Onde:

- A = Área do biodigestor (m^2);
- H = Altura do Biodigestor (m);
- V_s = Velocidade superficial (m/h);

Pode-se obter ainda o diâmetro do biodigestor (D), a partir da área:

$$A = \pi * \frac{D^2}{4} \quad (9)$$

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \Leftrightarrow D = \sqrt{\frac{4 * 0,125}{3,14}} = 0,40 \text{ m}$$

Onde:

- A = Área do biodigestor (m²);
- D = diâmetro do biodigestor (m);
- Constante $\pi = 3,14$;

➤ Cargas orgânicas

As cargas orgânicas volumétricas e hidráulicas volumétricas (COV e CHV) foram obtidas segundo Chernicharo *et al.* (cit. in Filho *et al.* 2018), considerando DQO = 330 mg/l = 0,00033 Kg/L de acordo com os critérios estabelecidos por Viera (1996):

$$COV = \frac{Q_{\text{méd.}} * S}{V_R} \quad (10)$$

$$COV = \frac{0,42 * 0,33}{0,14}$$

$$COV = 0,99 \text{ KgDQO/m}^3.\text{d}$$

$$CHV = \frac{1}{TRH} \quad (11)$$

$$CHV = \frac{1}{8/24} = 3 \text{ m}^3 / \text{m}^3.\text{d}$$

Onde:

- COV = Carga Orgânica Volumétrica (KgDQO/m³.d);
- CHV = Carga Hidráulica Volumétrica (m³/ m³.d);
- S = Concentração de substrato afluente (KgDQO/m³);
- TRH = Tempo de Retenção Hidráulica (horas);
- V_R = Volume do Biodigestor (m³);

➤ **Potencial de produção de biogás**

O potencial de biogás produzido será determinado a partir da produção de metano do processo de biodigestão.

Segundo Souza *et al.* (cit. in Santos 2009) parte significativa do metano produzido no biodigestor poderá ser perdida solubilizada no efluente, reduzindo o potencial energético do biogás.

Seguindo a metodologia de Capassi *et al.* (2013) determinou-se primeiramente a estimativa de remoção de DQO e DBO, permitindo assim conhecer a eficiência do biodigestor UASB entre as temperaturas de 20°C e 26°C, por meio das equações seguintes:

$$E_{DQO} = 100 * (1 - 0,68 * TRH^{-0,35}) \quad (12)$$

$$E_{DQO} = 100 * (1 - 0,68 * 8^{-0,35})$$

$$E_{DQO} = 67,15\%$$

$$E_{DBO} = 100 * (1 - 0,70 * TRH^{-0,50}) \quad (13)$$

$$E_{DBO} = 100 * (1 - 0,70 * 8^{-0,50})$$

$$E_{DBO} = 75,25\%$$

Onde:

- DQO = Demanda química de oxigénio (Kg/L);

- DBO = Demanda bioquímica de oxigénio (Kg/L);
- E_{DQO} = Eficiência do reator UASB, em termos de remoção de DQO (%);
- E_{DBO} = Eficiência do reator UASB, em termos de remoção de DBO (%);
- TRH = Tempo de Retenção Hidráulica (horas);
- 0,68 = Constante empírica;
- 0,35 = Constante empírica;
- 0,70 = Constante empírica;
- 0,50 = Constante empírica;

Após obter as eficiências de remoção, calcula-se a concentração de DQO e DBO no efluente, considerando DQO do afluente de 330mg/L ($DQO_{afluente}$) e DBO do afluente de 150mg/L ($DBO_{afluente}$)

$$DQO_{efluente} = \frac{E_{DQO} * DQO_{afluente}}{100} \quad (14)$$

$$DQO_{afluente} = \frac{67,15 * 330}{100}$$

$$DQO_{afluente} = 221,6 \text{ mg/L}$$

$$DBO_{efluente} = \frac{E_{DBO} * DBO_{afluente}}{100} \quad (15)$$

$$DBO_{afluente} = \frac{75,25 * 150}{100}$$

$$DBO_{afluente} = 112,8 \text{ mg/L}$$

Onde:

- $DQO_{efluente}$ = Concentração de DQO no efluente (mg/L);

- $DBO_{\text{efluente}} = \text{Concentração de DBO no efluente (mg/L)}$;
- $E_{DQO} = \text{Eficiência do reator UASB, em termos de remoção de DQO (\%)}$;
- $E_{DBO} = \text{Eficiência do reator UASB, em termos de remoção de DBO (\%)}$;
- $DBO_{\text{afluente}} = \text{Concentração de DBO no afluente (mg/L)}$;
- $DQO_{\text{afluente}} = \text{Concentração de DQO no afluente (mg/L)}$;

De seguida, estima-se segundo Chernicharo (cit. in Capassi *et al.* 2013) a quantidade de DQO no afluente que é convertida em metano:

$$DQO_{CH_4} = Q_{\text{méd}} * (DQO_{\text{afluente}} - DQO_{\text{efluente}}) - Y * Q_{\text{méd}} * DQO_{\text{afluente}} \quad (16)$$

$$DQO_{CH_4} = 0,42 * (0,33 - 0,2216) - 0,11 * 0,42 * 0,33$$

$$DQO_{CH_4} = 0,0302 \text{ KgDQO}_{CH_4}/\text{dia}$$

Onde:

- $DQO_{CH_4} = \text{Concentração de DQO convertida em metano (KgDQO}_{CH_4}/\text{dia)}$;
- $Y = \text{coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO (0,11 a 0,23 KgDQO}_{\text{lodo}}/\text{KgDQO}_{\text{apl}})$;
- $DQO_{\text{efluente}} = \text{Concentração de DQO no efluente (Kg/m}^3)$;
- $DQO_{\text{afluente}} = \text{Concentração de DQO no afluente (Kg/m}^3)$;
- $Q_{\text{méd.}} = \text{Vazão média (m}^3/\text{dia)}$;

Tendo com finalidade a produção de metano no biodigestor o fator de correção de temperatura operacional é obtido por meio da equação:

$$f_T = \frac{P * Kg_{DQO}}{R * (273 + T)} \quad (17)$$

$$f_T = \frac{1 * 64}{0,08206 * (273 + 24)}$$

$$f_T = 2,62 \text{ KgDQO/m}^3$$

Onde:

- f_T = Fator de correção da temperatura operacional do biodigestor (KgDQO/m^3);
- P = Pressão atmosférica (1 atm);
- KgDQO = DQO correspondente a um mol CH_4 (64 gDQO/mol);
- R = Constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.K);
- T = Temperatura operacional do reator ($^\circ\text{C}$);

Uma vez encontrado o DQO_{CH_4} e o f_T , pode-se assim determinar a produção de metano pela equação que se segue:

$$Q_{\text{CH}_4} = \frac{\text{DQO}_{\text{CH}_4}}{f_T} \quad (18)$$

$$Q_{\text{CH}_4} = \frac{0,0302}{2,62}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = 0,011 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Onde:

- Q_{CH_4} = Produção volumétrica de metano (m^3/dia);
- DQO_{CH_4} = Concentração de DQO convertida em metano ($\text{KgDQO}_{\text{CH}_4}/\text{dia}$);
- f_T = Fator de correção da temperatura operacional do biodigestor (KgDQO/m^3);

Considerando uma percentagem de metano presente no biogás ($\%\text{CH}_4 \text{ biogás}$) de 60% (Neto et al. 2016), pode-se estimar segundo Capassi *et al.* (2013) a produção de biogás ($Q_{\text{biogás}}$):

$$Q_{\text{biogás}} = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{\%\text{CH}_4 \text{ biogás}} \quad (19)$$

$$Q_{\text{biogás}} = \frac{0,011}{0,6} = 0,018 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Onde:

- $Q_{\text{biogás}}$ = Produção volumétrica de biogás (m^3/dia);
- Q_{CH_4} = Produção volumétrica de metano (m^3/dia);
- $\% \text{CH}_4 \text{ biogás}$ = Percentagem de metano no biogás (%);

6.4. Construção do biodigestor

O biodigestor terá o formato cilíndrico, o material usado para sua construção será concreto e apresentará as seguintes dimensões, obtidos no dimensionamento do mesmo.

Tabela 7: Dimensões do biodigestor

Designação	Dimensões
Altura (m)	4
Diâmetro (m)	0,4
Área (m^2)	0,125
Volume (m^3)	0,14
Espessura das paredes (m)	0,25

Fonte: Elaboração própria

As paredes serão construídas de concreto, enquanto a laje, a cobertura e o defletor serão de concreto armado. O concreto, por definição é uma mistura de cimento e brita e água, enquanto concreto armado, além da mistura será adicionado uma armação de ferro.

O biodigestor deverá ser dotado de uma tubulação para entrada do afluente, saída de efluente, saída do biogás, descarte e amostragem de lodo, ambos de polietileno.

No interior o biodigestor possuirá ainda o separador trifásico que será de lona sintética.

A estimativa de materiais e respetivos custos para construção do biodigestor são apresentados de forma resumida na tabela a seguir.

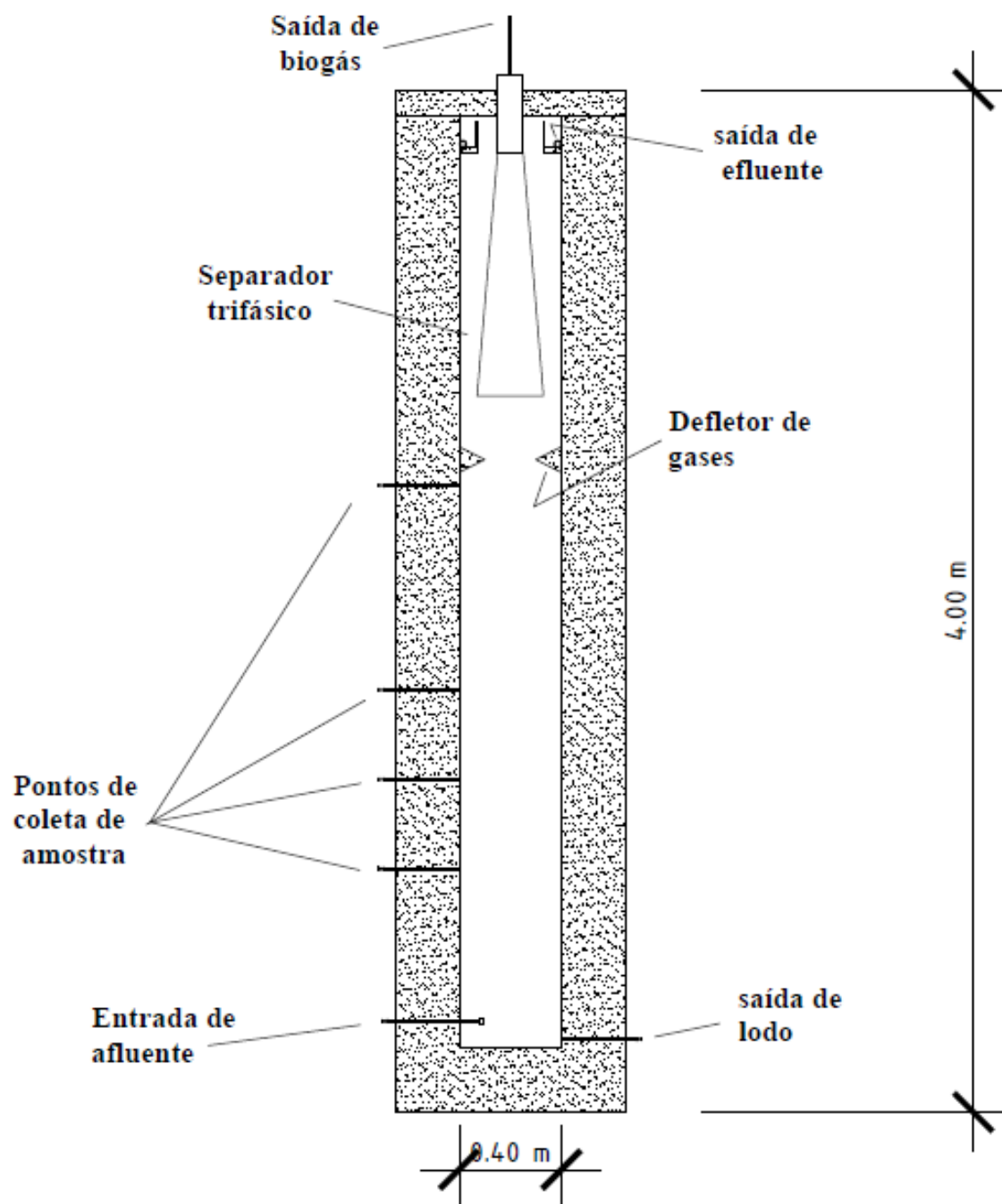
Tabela 8: Materiais para a construção do biodigestor e respetivos custos

Material	Quantidade	Custo unitário (ECV)
Saco de cimento	1	750
Varra de ferro de 8 mm	1	430
Latas de areia	5	39
Latas de brita	6	39
Lona de polietileno (m ²)	1	617
Tubulação de polietileno (m)	5	210
Custo total: 3276 ECV		

Fonte: Elaboração própria.

Os custos apresentados em ECV (Escudos Cabo-Verdianos), tiveram origem na análise do mercado de Cabo Verde e no software para engenharia e construção, um gerador de preços por CYPE ingenieros, S.A.

Figura 7: Corte esquemático do biodigestor UASB



Fonte: Elaboração própria.

6.5. Monitoramento e controle do biodigestor

O biodigestor será monitorizado e controlado por um operador com o auxílio de um controlador multi-parâmetros que permitirá controlar todo o processo da biodigestão, fornecendo dados para que este ocorra dentro da normalidade, garantindo a sua eficiência.

6.5.1. Controlador multiparâmetros série 9900

É um transmissor que fornece uma interface de canal único para muitos parâmetros como: pH/ORP, condutividade/resistividade, salinidade, temperatura, pressão e nível, permitindo ajuste remoto da entrada 4-20mA. Sua configuração pode ser feita via software, compatível com Windows XP/vista/7 além de possuir versões de campo ou para instalação em painel.

Ambas as configurações têm um display retro iluminado com detecção automática extra grande (3,90 “x 3,90”) apresenta visibilidade “instantânea” que pode ser visualizada a uma distância de 4 a 5 vezes maior que os transmissores tradicionais. A tela altamente iluminada e os caracteres grandes reduzem o risco de interpretar incorretamente ou interpretar incorretamente os valores exibidos. O visor mostra linhas separadas para unidades, medições principais e secundárias, bem como um gráfico de barras digital “tipo discagem”.

O 9900 pode funcionar com alimentação de 12 a 32 VCC (24 VCC nominal) e também pode ser alimentado por loop com sensores compatíveis.

As opções do kit incluem uma tampa articulada para instalações montadas em parede ou tubo, ou uma tampa plana projetada para caber dentro de um painel para proteção à prova d'água.

A unidade pode ser usada com valores padrão para programação rápida e fácil ou pode ser personalizada com rotulagem, configurações de discagem mínima e máxima ajustáveis e opções de unidade de medida e posição decimal.

Aplicações:

- Tratamento de águas residuais;
- Osmose Inversa;
- Deionização: Água ultrapura, sistema de 2 cama e sistema de cama mista;
- Fabricação / Adição de Produtos Químicos;
- Acabamento em Metal e Plástico;
- Purificador de Fumos;
- Torres de refrigeração;
- Filtragem do meio;

Características:

- Módulo Modbus⁹ suporta comunicações serial RS485 Modbus;
- Vários tipos de sensores suportados com um único instrumento;
- Gráfico de barras digital “tipo discado”;
- Os módulos são de instalação e substituição a qualquer momento;
- Módulo de relé opcional para adição de dois relés de contato seco;
- Módulo H COMM opcional para comunicação bidirecional;
- Módulo de lote opcional para controlo de lote;
- Módulo Modbus para conexão a redes Serial, RS485, Modbus;
- Uma saída de 4 a 20 mA na unidade base. Um adicional de 4 a 20 mA disponível com módulo opcional;
- Kits de Gabinete Traseiro para montagem em painel, parede ou tubo;
- Indicadores LED de aviso e relé para visibilidade imediata;
- Recursos personalizáveis, incluindo etiqueta digital para identificação personalizada;
- Ferramenta de configuração PC COMM opcional para configuração em um PC;

⁹ O Modbus é um protocolo industrial de requisição-resposta que utiliza um relacionamento mestre-escravo para possibilitar a comunicação entre dispositivos de automação (National Instruments).

6.6. Sistema híbrido butano/biogás

6.6.1. Descrição

O biogás, uma vez produzido pode ser usado para vários fins, uma das alternativas é a sua utilização no cozimento de alimentos. Em Cabo Verde, de entre as alternativas para o cozimento, usa-se o gás butano que pode ser disponibilizado para consumo em botijas que são ligadas diretamente no ponto de consumo final (fogão) ou armazenado em reservatórios apropriados e canalizado até ponto de consumo final.

O presente sistema surge como uma grande alternativa de aproveitamento energético do biogás produzido por meio da digestão anaeróbica em qualquer tipo de biodigestor. O biogás, uma vez produzido é armazenado e em seguida distribuído por meio de tubulações até o ponto de consumo.

Para garantir o fornecimento de gás sempre que necessário o sistema será automatizado para funcionar com os dois gases, butano e biogás alternadamente e terá os seguintes componentes:

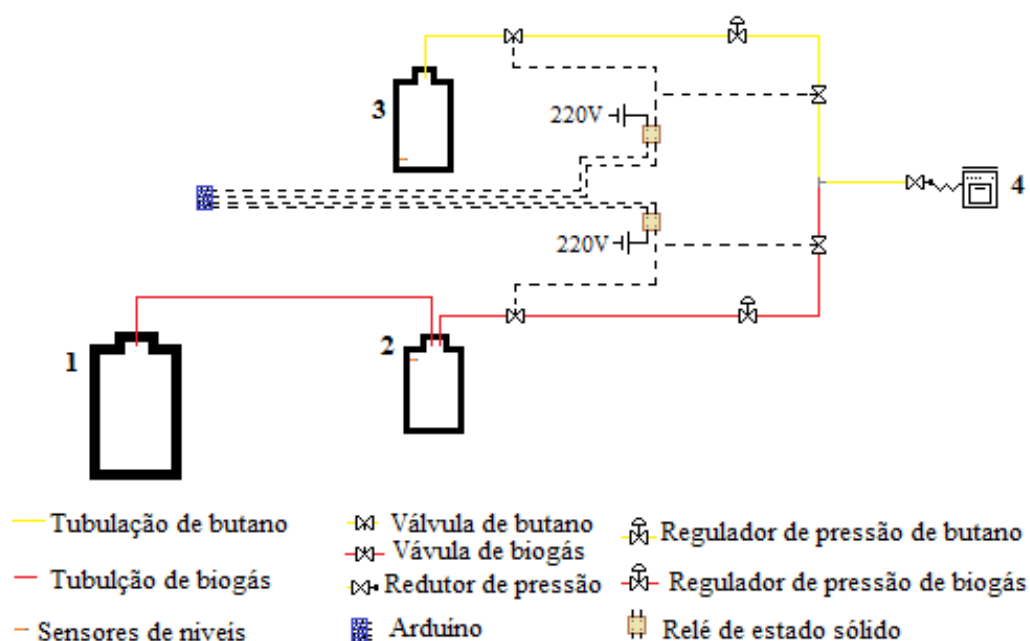
- Reservatório de biogás;
- Reservatório de butano;
- Tubulações de biogás e butano;
- Sensores de níveis;
- Reguladores de pressão;
- Válvulas;
- Redutor de pressão;
- Arduíno;
- Relé de estado sólido;

O Arduíno é o componente chave para o sucesso do sistema pois controlará a abertura das válvulas de passagem de biogás e butano. O Arduíno é programado para abrir a válvula de

passagem de biogás quando não houver gás no reservatório de butano e sempre que houver biogás a pressão e caudal suficiente no reservatório de biogás para percorrer a tubulação de gás e chegar ao consumo final, caso contrário se manterá fechada e a válvula de butano aberta. As informações de pressão e caudal do biogás e butano, nos respectivos reservatórios serão fornecidas pelos sensores de níveis instalados nos reservatórios.

Os reguladores de pressão, instalados nas tubulações após a saída dos reservatórios controlam a pressão de gás na tubulação aumentando e diminuindo a pressão para que o gás circule a velocidade e pressão adequado garantindo a segurança da tubulação até o destino pretendido. O redutor de pressão ajustará a pressão para o consumo final, seguindo as normas de segurança estabelecidos para pressão de serviço.

Figura 8: Sistema híbrido butano/biogás



Fonte: Elaboração própria.

Legenda da figura (10):

1- Biodigestor

- 2- Reservatório de biogás
- 3- Reservatório de butano
- 4- Ponto de consumo

6.6.2. Automação do sistema

O sistema será automatizado por um Arduino que nada mais é do que um microcontrolador que tem por função gerir e comandar o sistema de automação do circuito.

Além deste Arduino também serão necessários um conjunto de sensores e válvulas de forma a agirem como atuadores no sistema permitindo analisar o nível dos gases nos reservatórios assim como abrir e fechar as válvulas dando prioridade as fontes de consumo.

No Arduino será introduzido o código em linguagem C e a este Arduino serão acoplados tanto os sensores como as electroválvulas com relés de estado sólido a meio vão. Os sensores servirão de input de dados para o Arduino realizar as suas análises e executar as funções conforme as leituras fornecidas pelos sensores de nível do butano e do biogás.

Após estas leituras o Arduino envia um conjunto de ordens a serem executadas pelas válvulas, nomeadamente e seguindo a lógica do código criado. A lógica de funcionamento pode ser descrita da seguinte forma: quando o reservatório de gás butano estiver disponível ou seja havendo butano o Arduino sente o sensor de nível marcando o valor binário 1 ou true, sendo assim, ele manda abrir a válvula de gás butano e fecha a do biogás. Num segundo momento se não houver gás butano este analisa o sensor de nível do biogás e analisa se o nível disponível deste biogás é suficiente para alimentar o consumo, se sim este fecha a válvula de butano e abre a do biogás até que o reservatório de gás butano seja de novo repostado aos seus níveis normais.

➤ Código no Arduino

A automação do sistema comandada pelo Arduino realizar-se-á conforme o seguinte código:

```
int sensor_gas=3;
int sensor_biogas=4;
int valvula_gas=5;
int valvula_biogas=6;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(sensor_gas,INPUT);
  pinMode(sensor_biogas,INPUT);
  pinMode(valvula_gas,OUTPUT);
  pinMode(valvula_biogas,OUTPUT);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  int estado=digitalRead(sensor_gas);
  switch(estado)
  {
  case 0:
    if(digitalRead(sensor_biogas))
    {
      digitalWrite(valvula_gas,LOW);
      digitalWrite(valvula_biogas,HIGH);
    }
    else
    {
      digitalWrite(valvula_gas,HIGH);
```

```

digitalWrite(valvula_biogas,LOW);
}
break;
case 1:
digitalWrite(valvula_gas,HIGH);
digitalWrite (valvula_biogas,LOW);
break;
}
}

```

Figura 9: Código compilado

```

sketch_jun06a
pinMode(sensor_gas, INPUT);
pinMode(sensor_biogas, INPUT);
pinMode(valvula_gas, OUTPUT);
pinMode(valvula_biogas, OUTPUT);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  int estado=digitalRead(sensor_gas);
  switch(estado)
  {
  case 0:
  if(digitalRead(sensor_biogas))
  {
    digitalWrite(valvula_gas,LOW);
    digitalWrite(valvula_biogas,HIGH);
  }
  else
  {
    digitalWrite(valvula_gas,HIGH);
    digitalWrite(valvula_biogas,LOW);
  }
  break;
  case 1:
    digitalWrite(valvula_gas,HIGH);
    digitalWrite(valvula_biogas,LOW);
    break;
  }
}

```

Compilação terminada.

O sketch usa 998 bytes (3% de espaço de armazenamento para programas. O máximo são 32256 bytes.
 Variáveis globais usam 9 bytes (0% de memória dinâmica, deixando 2039 bytes para variáveis locais. O máximo são 2048 bytes.

10

Fonte: Elaboração própria.

6.6.3. Construção do sistema híbrido butano/biogás

Elaborou-se o sistema com objetivo de transportar o biogás ou butano, alternadamente, desde os respetivos reservatórios até o ponto de consumo, garantindo todos os requisitos de segurança e de modo a se obter o melhor aproveitamento possível do biogás gerado.

Para a sua construção, optou-se por usar a tubulação de polietileno para o transporte do biogás enquanto uma tubulação de butano e do trecho que entregará o gás ao ponto de consumo final será de cobre. Na tabela seguinte apresenta-se um resumo dos elementos que constituirão o sistema e seus respetivos custos.

Tabela 9: Resumo de quantidade de equipamentos do sistema híbrido e respetivos custos

Designação	Quantidade	Custo unitário (ECV)
Tubulação de cobre (m)	10	289,17
Tubulação aço inoxidável (m)	8	247,13
Válvula elétrica	4	890
Relé de estado sólido	2	400
Sensor de nível	2	3910
Redutor de pressão	1	700
Arduíno	1	450
Regulador de pressão	2	380
Custo Total: 18960 ECV		

Fonte: elaboração própria.

Nos custos referentes às tubulações, inclui-se acessórios e peças especiais. O custo total da implementação do sistema híbrido deverá incluir ainda o preço de mão-de-obra qualificada para se realizar a instalação.

7. Impactes Ambientais

Atualmente, de acordo com a conjuntura ambiental, deve-se ter em consideração os potenciais impactes de um qualquer projeto que se pretende implementar. Assim sendo, em primeira análise deve-se consultar a legislação nacional nesse sentido. Neste caso, ao consultar-se o Boletim Oficial, nº10, 6 de Março de 2006, constatou-se que o presente projeto não requer de um processo de avaliação de impactes ambientais, por não constar do Anexo I do referido Boletim Oficial.

No entanto, apesar de não ser abrangido não implica que não se reflita sobre os potenciais impactes do projeto. Segundo Bontempo (2016), o biogás substitui os combustíveis fósseis e fertilizantes minerais sintéticos, reduzindo as emissões de dióxido de carbono e metano.

O meio ambiente só será exposto a perigo no caso de emissões gasosas, como a de fuga de biogás para a atmosfera e se materiais de trabalho, como por exemplo o substrato, alcançarem um corpo de água próximo das instalações. Entretanto isto só será possível em caso de acidente, originado por falhas estruturais ou erros operacionais.

Para evitar emissões gasosas todo trabalho de construção deverá ser o mais estanque possível e no armazenamento de biogás deve-se garantir que o sistema de proteção contra sobrepressão não seja acionado com frequência sendo que este implicará emissões de gases.

A emissão de amoníaco no ar e no solo deve ser levada em conta. Pois o amoníaco causa acidificação do solo, provoca a eutrofização, danos à vegetação e pode ter um impacto prejudicial à saúde (em concentrações mais altas é tóxica).

As técnicas utilizadas na adubagem têm uma influência crucial na emissão de amoníaco. Sempre que possível, fertilizantes de material digerido devem ser aplicados ao solo rapidamente, evitando a aplicação quando a temperatura ambiente estiver alta (preferencialmente aplicar em dias frescos ou evitando o meio do dia). Por segurança no caso de armazenamento do biofertilizante o local deve ser bem isolado (Bontempo 2016).

Os impactos ambientais são mais significativos na produção de biogás em grande escala como é o caso das centrais.

O projeto por ser de pequena dimensão, a sua construção e operação não apresentará impactos significativos a nível de ruídos, fauna, flora. Dependendo do local de implementação poderá gerar algum desconforto em termos paisagístico e na qualidade do ar no caso de fuga de biogás ou do mau manuseamento do lodo gerado.

8. Análise financeira

A realização da análise financeira terá como objetivo determinar a o custo de implementação do projeto, a redução de custos de consumo de gás butano, derivados da produção de biogás e retorno do investimento.

8.1. Custo de implementação do projeto

No caso em estudo, os custos de implementação estão associados a construção e monitoramento do biodigestor e construção do sistema híbrido butano/biogás.

De acordo com os cálculos realizados, levando em conta os materiais a serem usados na sua construção, o biodigestor apresentará um custo de 3276 ECV. Enquanto o custo de monitoramento do processo de biodigestão anaeróbia, realizado pelo controlador de multiparâmetros será de 36825 ECV.

O custo da construção do sistema híbrido será de 18960 ECV e foi elaborado de acordo com os equipamentos que compõem o sistema e envolveu uma pesquisa de mercado.

O custo final da execução do projeto, apresenta-se de forma resumida na tabela que se segue.

Tabela 10: Resumo do custo final do projeto

Designação	Custo (ECV)
Construção do biodigestor	3276
Controlador multiparâmetros	36825
Sistema híbrido	18960
Mão-de-obra	5376
Outros custos	1000
Custo Final = 65437 ECV	

Fonte: Elaboração própria

No custo de mão- de-obra considerou-se o pagamento a um instalador de gás na razão de 472 ECV por hora e de um operador de construção civil no valor de 1600 ECV por dia. Enquanto os “outros custos” referidos na tabela anterior fazem referência a pregos, parafusos, arame queimado, entre outros de igual importância.

8.2. Redução de custos do consumo de gás butano, derivados da produção de biogás

A redução dos custos do referido consumo depende diretamente equivalência energética do biogás em gás butano, considerando o consumo de gás butano e da quantidade de biogás produzido.

O volume de gás butano gerado por quilograma líquido é de $0,539 \text{ m}^3$. Considerando o consumo mensal de uma garrafa de gás butano de 12,5Kg, o volume de gás usado para cozimento será de $6,7375 \text{ m}^3/\text{mês}$ pelo custo médio 1620 ECV.

Segundo Silva (2014), 1 m^3 biogás equivale a $0,2 \text{ m}^3$ de butano. Levando em conta a produção de biogás estimada em $0,018 \text{ m}^3/\text{dia}$, obtém-se um valor mensal de $0,54 \text{ m}^3$ de biogás,

correspondendo a 0,108 m³/mês de butano, de acordo com os requisitos apresentados anteriormente.

A produção de biogás representará uma redução de custo em 26 ECV mensais, multiplicando o valor mensal pelo número de meses um ano obtém-se uma redução de 312 ECV.

8.3. Retorno do investimento

A partir dos valores obtidos anteriormente, determina-se o retorno do investimento dividindo o custo final de implementação do projeto pela redução de custo anual. Sendo assim:

$$\text{Retorno de investimento} = \frac{\text{Custo de implementação}}{\text{redução anual}} \quad (20)$$

$$\text{Retorno de investimento} = \frac{65437}{312} = 209 \text{ anos}$$

O projeto terá um tempo de retorno de investimento de 209 anos.

9. Resultados e discussões

Após a realização de todos os cálculos do projeto, que resultaram no dimensionamento do biodigestor UASB e seus parâmetros operacionais, que se consideraram essenciais para obtenção de resultados dignos de confiança, foi possível determinar a quantificação energética de biogás produzido.

Todos os resultados dos cálculos são apresentados de forma resumida na tabela que se segue. Porem, vale realçar que os referidos resultados levaram em conta apenas as águas residuais residenciais com o fim de avaliar o potencial energético do mesmo.

Tabela 11: Resultado dos parâmetros de dimensionamento do biodigestor UASB

Parâmetros	Resultados
$Q_{\text{méd.}} \text{ (m}^3\text{/dia)}$	0,42
$Q_{\text{máx.}} \text{ (m}^3\text{/dia)}$	0,756
$Q_{\text{min.}} \text{ (m}^3\text{/dia)}$	0,21
Volume (m^3)	0,14
TRH (horas)	8
CHV ($\text{m}^3 / \text{m}^3 \cdot \text{d}$)	3
COV ($\text{KgDQO}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)	0,99
$E_{\text{DQO}} \text{ (%)}$	67,15
$E_{\text{DBO}} \text{ (%)}$	75,25
$\text{DQO}_{\text{efluente}} \text{ (mg/L)}$	221,6
$\text{DBO}_{\text{efluente}} \text{ (mg/L);}$	112,8
$\text{DQO}_{\text{CH}_4} \text{ (KgDQO}_{\text{CH}_4}\text{/dia)}$	0,0302
$Q_{\text{CH}_4} \text{ (m}^3\text{/dia)}$	0,011
$Q_{\text{biogás}} \text{ (m}^3\text{/dia)}$	0,018

Fonte: Elaboração própria.

Numa avaliação aos resultados, confirmou-se o valor energético das águas residuais domésticas para a produção do biogás.

Porém, perante os critérios pré-estabelecidos, que tiveram como referência a produção de águas residuais residenciais por uma família de cinco indivíduos, a produção de biogás atingiu níveis considerados inviáveis para aproveitamento. Pois, com uma produção de $0,54 \text{ m}^3\text{/mês}$ de biogás, a redução de custo mensal no uso de butano foi de apenas 26 ECV e consequentes 312 ECV anuais. Confirmando assim a sua inviabilidade, perante o valor investido na implementação do projeto de 65437 ECV e um retorno inexistente.

No estudo realizado a implementação do projeto revelou-se inviável, apenas sob condições pré estabelecidas, nomeadamente a vazão do projeto em virtude do substrato utilizado que apresenta concentrações baixas de matéria orgânica. Entretanto não inviabiliza a sua implementação em escalas de maior envergadura, perante vazões e concentrações de matérias orgânicas maiores.

O trabalho poderá servir de referência, para dimensionamentos futuros de biodigestores do tipo UASB para a produção de biogás por meio de outros tipos de substratos, ou mesmo a partir das águas residuais, considerando vazões maiores como é caso de hotéis, comunidades ou estações de tratamento de esgoto.

Quanto ao sistema híbrido dimensionado é claramente uma mais-valia para o aproveitamento do biogás gerado a partir de qualquer tipo de substrato, necessitando apenas de ser ajustado em termos de dimensões consoante a demanda do projeto em causa.

10. Conclusões

Elaborou-se o presente trabalho com o objetivo de avaliar o potencial energético contido nas águas residuais residências tendo em vista o seu aproveitamento num sistema híbrido butano/biogás. Para a realização do estudo foram definidos os critérios a serem levados em conta para dimensionamento do projeto e decidiu-se avaliar o potencial energético da produção de águas residuais de uma residência familiar constituída por cinco pessoas.

Com base nos critérios definidos estimou-se as vazões do projeto, que serviram como base para o dimensionamento do biodigestor e consequentes cálculos dos parâmetros envolvidos no processo de biodigestão possibilitando determinar a produção de biogás.

O sistema híbrido foi projetado e automatizado de forma a aproveitar o biogás gerado num sistema complexo, que consistiu em transportar o recurso energético desde o reservatório até o ponto de consumo final.

A realização de qualquer estudo implica riscos e os resultados finais podem ser positivos ou negativos. Infelizmente no presente estudo os resultados não foram satisfatórios.

O potencial energético das águas residuais residências sob as vazões consideradas do projeto acabou por se confirmar, mas mostrando-se insuficiente para ser aproveitado de modo viável no sistema híbrido dimensionado. A produção revelou-se muito baixa e sem qualquer perspectiva de retorno financeiro.

Inviabilidade implementação do projeto que tinha como um dos objetivos aproveitar o biogás gerado numa residência, não desvaloriza o trabalho, uma vez que foi elabora todo um estudo de dimensionamento de um biodigestor UASB, que poderá ser usado para dimensionamentos futuros. Elaborou-se ainda um sistema híbrido que independentemente do substrato utilizado para produção de biogás poderá servir o seu aproveitamento em qualquer residência.

11. Recomendações

Foi comprovado por meio dos resultados obtidos que a produção de águas residuais residências originadas apenas de uma residência familiar, não possui o potencial energético suficiente para ser aproveitado. Porém, como solução recomenda-se o tratamento do esgoto gerado sobretudo em residências sem acesso à rede de esgotos e em zonas rurais, pois contribuir-se-á para o melhoramento do saneamento e os subprodutos (água tratada e lodo) gerados no processo poderão ser valorizados. A água tratada pode ser usada para fins não potáveis como a rega, lavagem de carros e limpeza domiciliar, enquanto o lodo gerado poderá ser usado como biofertilizante para o enriquecimento do solo.

Para trabalho futuro recomenda-se a execução do estudo para produções muito maiores de modo a comprovar a sua viabilidade em larga escala. Bem como a implementação do sistema híbrido butano/biogás numa residência, usando substratos com maior taxa de produção de biogás diária, nomeadamente os dejetos bovinos ou suínos.

12. Referências Bibliográficas

Alves, E., Inoue, K., Borges, A. (2010). *Biodigestores: construção, operação e usos do biogás e do biofertilizante visando a sustentabilidade das propriedades rurais*. Universidade Federal de Viçosa – Viçosa/MG.

Bontempo, G., Maciejczyk, M., Wagner, L., Findeisen, C., Fischer, M., Hofmann, F. (2016). *Biogas, Safety First: Diretrizes Para O Uso Seguro Da Tecnologia De Biogás*. Fachverband Biogas e.V. Alemanha.

Capassi, C. M., Costa, J. C., Cantil, M. E. S., Navarro, R. S., Romera, Y. F., Subtil, E. L., Chagas, R. K. (2013). *Dimensionamento de um reator uasb para o tratamento de águas residuárias de suinocultura*, Revista de saúde, meio ambiente e sustentabilidade. Vol. 8, n. 2, p.19-39.

Carreas, N. (2013). *Programa de Capacitação em Energias Renováveis: O Biogás*. Observatório de energias renováveis para a América Latina e o Caribe.

Carvalho, M. L. S, Brito, A.M., Monteiro, E.P (2010). *Plano Nacional de Saneamento Básico*. Cidade da Praia, Cabo Verde, 73p.

Castanho, D.; Arruda, H. (2008). *Biodigestores*. VI Semana de Tecnologia em Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

Castro, D.; Mateus, V. (2016). *Produção de biogás a partir de restos de alimentos coletados em um restaurante: uma experiência a ser disseminada*. XV SEPA – Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, UNIFACS.

CENBIO (2001). *Nova Técnica VII: Geração de Energia a Partir do Biogás Gerado por Resíduos Urbanos e Rurais*. São Paulo.

Costa, D. F., (2006). *Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás do Tratamento de Esgoto*. Programa de interunidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

CYPE Ingenieros, S.A. *Software para engenharia e construção. Gerador de custo. Cabo Verde*. Disponível em:

<http://www.caboverde.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=1|0_0_1_0_0_0|1|ADR030|adr_rell%20cielo_abierto: 0_0_8c12_0_1>. Consultado em [17 /06/2019].

Deganutti, R., Palhaci, M. C. J. P., Rossi, M., Tavares, R., Santos, C. (2002). *Biodigestores rurais: modelos indiano, chinês e batelada*. Disponível em:

<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores_000g76qdzev02wx5ok0wtedt3spdi71p.pdf>. [Consultado em: 22/11/2018].

ENACOL, Empresa Nacional de Combustíveis (2011). *Relatório e Contas 2010*. Disponível em:

<<http://www.bcv.cv/vPT/Mercado%20de%20Capitais/Sistema/Emitentes/Presta%C3%A7%C3%A3o%20de%20Contas/Documents/Relat%C3%B3rios%20e%20Contas%20em%202011/Relat%C3%B3rioContas%20ENACOL%202010.pdf>>. [Consultado em: 01/07/2019].

Filho, A., Mensah, J., Battiston, K., Barros, M., Santos, I. (2018). *Dimensionamento de um Reator UASB para Tratamento de Efluentes domésticos e recuperação do biogás para produção energética: Um estudo de caso em Pouso Alegre (MG)*, Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.7, n.1, p. 77-94.

Filho, J. A. (1981). *Biogás: Independência Energética Do Pantanal Mato-Grossense*. EMBRAPA-UEPAE Corumba.

Francisco, W., C. *Butano*. Brasil Escola. Disponível em:

<<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/butano.htm>>. [Consultado em 21 de maio de 2019].

Frigo, K., Feiden, A., Galant, N., Santos, R., Mari, A., Frigo, E. (2010). *Biodigestores: seus modelos e aplicações*. Acta Iguazu, Cascavel, v.4, n.1, p. 57-65.

Hope, K., (2016). *As empresas que transformam fezes humanas em lucro*. BBC News Brasil. Disponível em <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-37998139>>. [Consultado em 02/11/2018].

Infopédia (2019). *Gás butano*. Porto Editora. Disponível em: <[https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\\$gas-butano](https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/$gas-butano)>. [consultado em 18/06/2019].

Karlsson, T., Konrad, O., Lumi, M., Schmeier, N., Marder, M., Casaril, C., Koch, F. & Pedroso, A., (2014). *Manual Básico De Biogás*. Ed. Univates. Lajeado.

Legner, C., (2015). *Reactor UASB para tratamento biológico de esgoto*. Revista TAE. Disponível em <<http://www.revistatae.com.br/9034-noticias>>. [Consultado em 13/04/2019].

Lobato, L. C. S. (2011). *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, Brasil.

Medeiros, M. A. C. *Caracterização Das Águas Residuárias*. ST 405-Química Sanitária e Laboratório de Saneamento II. Disponível em: <<https://www.ft.unicamp.br/~mariaacm/ST405/Apostila%20te%F3rica%20ST405.pdf>>. [Consultado em 29/05/2019].

Mendes, A., Cardoso, J., Évora, R. (2005). *Estratégia Nacional para Energias Domésticas em Cabo Verde*. Programa regional de promoção das energias domésticas e alternativas no Sahel. Ministério da Economia Crescimento e Competitividade. Direção Geral Da Industria e Energia e C.I.L.S.S. Praia.

Mesquita, L. (2005). *A introdução do gás natural em Portugal: características dos gases combustíveis*. p. 16 – 22. Disponível em: <<http://www.ipb.pt/~lmesquita/nova/04-05/redesdegas/Cap2-%20Gases%20combustiveis.pdf>>. [Consultado em 26/06/2019].

Monte, M., M. (2010). *Contributo para o Estudo da Valorização Energética de Biogás em Estações de Tratamento de Águas Residuais*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Sanitária - Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, Portugal.

MUNDI Consulting, Quaternaire Portugal (2018). *Final Report - Avaliação Ambiental e Social Estratégica do setor do Turismo em Cabo Verde*. Ministério Das Finanças, Unidade de Gestão de Projetos Especiais.

National Instruments (2019). *O protocolo Modbus em detalhes*. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-pt/innovations/white-papers/14/the-modbus-protocol-in-depth.html>> [Consultado em 05/06/2019].

Neto, A., Souza, Z. (2016). *Panorama do Biogás no Brasil – Setor Sucroalcooleiro*. ÚNICA – Oficina do Biogás e Biometano. Brasília – DF.

Oliveira, R. D. (2009). *Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em batedouro e as possibilidades no mercado de carbono*. Trabalho de Conclusão de Curso - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

Oliveira, R., Foresti, E. (2004). *Balanço De Massa De Reatores Anaeróbios De Fluxo Ascendente Com Manta De Lodo (UASB) Tratando Águas Residuárias De Suinocultura*. Jaboticabal, v.24, n.3, p.807-820, Set./Dez.

Paterson, M.; Kuhn, W., (2010). *Guia Prático do Biogás*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR).

Pereira, M., Godoy, T., Godoy, L., Bueno, W., Wegner, R. (2015). *Energias renováveis: biogás e energia elétrica provenientes de resíduos de suinocultura e bovinocultura na UFSM*. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental/Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas, 19 (3), pp. 239-247.

Pina, M., (2010). *Caracterização das águas residuais produzidas no campus universitário da FCT/UNL*. Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.

Prado, M.A.C. (2006). *Produção de biogás no tratamento dos efluentes líquidos de Coffea arabica L. em reator UASB para o potencial aproveitamento na secagem do café*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola - Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, Brasil.

Raboni, M., Urbini, G. (2014). *Production and use of biogas in Europe: a survey of current status and perspectives*. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, v. 9, n. 2, p. 191-202. Taubate.

Rissoli, C. A. (2004). *Estudo de parâmetros operacionais do reator UASB tratando esgoto doméstico e avaliação da biodegradabilidade do seu efluente*. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM – 073/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 125p.

Santo, F., (2008). *Editorial: “Na Natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”*, INGENIUM, pp. 5.

Santos, N. S. (2009). *Geração De Energia Elétrica A Partir Do Biogás Produzido Na Estação De Tratamento De Esgotos De Madre De Deus – Bahia*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre Profissional em Tecnologias Aplicáveis À Bioenergia- Faculdade De Tecnologia E Ciências. Salvador-BA.

Silveira, B., Chernicharo, C., Cabral, C., Suitedos, C., Platzer, C., Silva, G., Possetti, G. R. C., Hoffmann, H., Moreira, H. C., Adamatti, H. B., Miki, M., Silva, M., Takahashi, R., Miki, R., Rosenfeldt, S., Araújo, V. S. F., Valente, V. B., Villani, W. (2015). *Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) – Brasília, DF: Ministério das Cidades.*

Silva, A. R. (2014). *Viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás gerado em estação de tratamento de efluente industrial de cervejarias.* Dissertação de Mestrado em energia e ambiente – Universidade Federal do Maranhão. São Luís.

Soares, R. C., Silva, S. R. C. M. (2010). *Evolução Histórica do Uso de Biogás como Combustível.* Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFT: Cuiabá.

Shubeita, F. M., Webber, T., Fernandes, R., Marcon, C., Poehls, L. B. (2014). *Um Estudo sobre Monitoramento e Controle de Biodigestores de Pequena Escala.* Programa De Pós-Graduação Em Ciência Da Computação - Pontifícia Universidade Católica Do Rio Grande Do Sul. Porto Alegre.

Tunes, C., (2017). *Produção De Biogás A Partir Da Digestão Anaeróbica De Efluentes Orgânicos Em Reator UASB.* Universidade Federal do Tocantins Campus Universitário de Gurupi - Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia. Gurupi.

Vieira, S., (1996). *Tratamento de esgotos domésticos por reator anaeróbio de fluxo ascendente e manto de lodo, reator UASB.* Tese para obtenção do título de Doutor em Saúde Ambiental - Faculdade de saúde pública da Universidade de São Paulo.